



TITLE:

バッチプロセスの進捗管理とモデル埋め込みレシピの提案(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

河野, 浩司

CITATION:

河野, 浩司. バッチプロセスの進捗管理とモデル埋め込みレシピの提案.
京都大学, 2011, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2011-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k16051>

RIGHT:

バッチプロセスの進捗管理と モデル埋め込みレシピの提案

2011年

河野 浩司

目次

第 1 章	序論	3
1.1	研究の背景と目的	3
1.2	スケジューリングに対する取り組み	6
1.3	運転管理及び運転支援に対する取り組み	9
1.4	レシピ設計に対する取り組み	11
1.5	レシピ設計業務マネジメントに対する取り組み	12
1.6	本論文の構成	14
	参考文献	16
第 2 章	処理時間の変動を考慮したバッチプロセスにおける バッチ間バッファ時間設定方法	22
2.1	緒言	22
2.2	解決すべき課題	23
2.3	問題設定	24
2.4	処理時刻の導出	26
2.5	コントロールを考慮したスケジュール方法	32
2.6	シミュレーションによる検証	34
2.7	結言	42
	Nomenclature	43
	参考文献	43
第 3 章	バッチプロセスにおける進捗管理支援システム	44
3.1	緒言	44
3.2	遅延復旧を考慮したスケジュール	45
3.3	所要時間短縮工程の決定	48
3.4	支援システム	51
3.5	シミュレーションによる検証	54
3.6	複雑なプロセスへの拡張	60
3.7	結言	61
	Nomenclature	63
	参考文献	64

第4章	不確定要素を考慮したモデル埋め込みレシピの提案と 樹脂コンパウンド製品設計への適用	65
4.1	緒言	65
4.2	解決すべき課題	68
4.3	モデル埋め込みレシピの構築	68
4.4	樹脂着色剤製造プロセスへの適用	75
4.5	結言	81
	Nomenclature	82
	参考文献	83
第5章	レシピ設計業務におけるシミュレーションベースドマネジメント	85
5.1	緒言	87
5.2	現状の問題点	88
5.3	レシピ設計業務のモデル化	89
5.4	レシピの評価指標	94
5.5	アクティビティのパラメータに関する事項と業務の入出力の整理	98
5.6	レシピ設計業務管理へのシステムティックアプローチ	102
5.7	結言	114
	Nomenclature	116
	参考文献	116
第6章	結論	117
	謝辞	122
	本研究に関連する著者の発表論文	124

第1章

序論

1.1 研究の背景と目的

近年、大型の素材型プラントは人件費や原燃料費の安い東南アジアや中国に生産拠点が移り、日本国内では家電、自動車向けなどの高付加価値機能を有する樹脂や色材等を製造する機能化学品製造プラントの重要度が増している。このような背景から、変種変量生産に適しているバッチプロセスが注目されてきている。

しかしバッチプロセスでは、生産スケジューリング、運転シーケンスおよびプロセス制御系設計、運転管理業務の難しさや煩雑さが問題としてよく取り上げられており、解決すべき課題が多く残されていると言える。以下に主な課題と要因を整理する。

生産スケジューリングにおいては、生産途中でのスケジュールの見直し頻度が高いこと、そして経験に大きく依存した属人的な業務になってしまっていることが課題となっている。スケジュールの見直しを実施する主な要因として、マーケット動向の不確定性と製造所要時間のばらつきが考えられる。

運転シーケンスおよびプロセス制御系設計においては、対象プロセスで製造する製品の種類毎に望ましい製品を生産するための処理シーケンスと制御パラメータを決定するだけでなく、プラント運転における例外発生時の処理シーケンスを設計することに多くの時間を費やしている。そしてこの設計が不十分であると、製造現場では例外事象に試行錯誤で対応することになり、製造現場の負担になるだけでなく、個人の能力に依存した品質の作り込みが増えていく。このような状況になっているのは、レシピ設計段階で全ての例外を列挙することが難しいだけでなく、仮に列挙できたとしても全てのケースでプロセスや品質に与える影響が把握できないことが要因である。

運転管理においては、各バッチの運転が生産スケジュール通りに進捗しているか否かを適宜監視し、スケジュール修正の必要性の有無を判断すること、そしてレシピで規定された運転条件で運転されているか否かを監視し、外れていた場合に例外措置の実施可否を判断することが経験を必要とする業務になっている。遅延した状態を放置していた場合には、製造現場の作業段取りや検査、出荷等の関係部署の業務の段取りを変更させることになり、工場の操業全体に影響を及ぼしてしまう。バッチプロセスでの製造はレシピによって規定され、レシピの指示通りに処理すれば同一品質の製品を同一の処理時間で製造可能であることが特徴であり長所であるが、現実には同一レシピに基づいて製造してもオペレーションや設備の状態や、原料条件、

気温や湿度等の製造環境に起因してバッチ毎に製品の品質や製造所要時間に変動が生じている。そして、この変動が、プラント操業スケジュールを乱す要因となっている。

以上のバッチプロセスを取り巻く課題は、あくまでも二次、三次的に発生する表面的な現象であると思われる。各業務が規定されたレシピに基づいて実施されていることを鑑みると、レシピそのものに根本的な課題があるのではないかと考えられる。すなわち、安定した生産活動を実現するためにはレシピ情報の充実化が必要ということである。

国際規格 ANSI/ISA-S88.01¹⁾においてレシピは、特定の製品の製造要件をユニークに定義する上で必要な情報群と定義されている。これを広く解釈すると、誰でもいつでも同じ品質、同じ時間で製品を製造することができ、かつ、その製品を顧客が使用する段階で顧客の要求品質を実現し、廃棄もしくはリサイクルに関する内容までを網羅した情報群と言える。しかしながら製造業における現状のレシピは一般に、使用装置、使用原料とその所要量、製造手順、製造条件といった「ものの作り方」のみを示す場合が多い。さらにそれらはある前提条件下で設計されたものであり、その条件から外れると製品の品質や製造所要時間等が保証できない。それゆえ、原料の品質や装置の汚れ、外気温、湿度等の製造環境、製品需要等の市場環境は不確定要素として日々変化しており、画一的な「ものの作り方」を実施しているだけでは品質、時間、安全の観点で安定生産を維持できないと考えられる。

ここで、製品の生産活動で必要な情報を業務別に整理する。

- ・受注 / 計画業務

受注生産の場合は、顧客からオーダーを受けて、製品在庫の有無を確認する。在庫が無ければ製造仕掛け状況を確認する。仕掛けしていなければ、MRP (Material Requirements Planning) にて原材料入荷リードタイムおよび製品の製造リードタイムから要求納期実現可否を判断する。実現可能であれば対象製品の製造を生産スケジュールに組み込む。一方計画生産の場合は、過去数年の実績及び営業情報、需要予測から年度末に次年度の年間計画、年間計画に基づいて月末に次年度の月間計画、週末に次週の週間計画を立てる。この段階で定めるのは製造すべき製品の種類と量の計画である。さらにこの計画に基づいて、製造順番、装置割付を実施して生産スケジュールを策定する。すなわち本業務で必要な情報は、オーダー量、納期、使用原材料および所要量、製品および原材料在庫量、工程順、使用設備、設備能力、製造リードタイム、原材料入荷リードタイム、製造仕掛け状況等である。

- ・MRP

本業務は、オーダーから必要な原材料及び資材の所要量を算出し、各在庫量と照合して不足するようであれば購買依頼を実施するものである。必要な情報としては、製品の配合情報、出荷形態に基づいた必要包材、封緘方法、付属品、ラベル要否 / 種類等である。

- ・購買 / 原材料受入

原材料には天然原料と加工原料がある。天然原料は産地や採取時期により特性が異なり、加工原料の品質の安定性は原料ベンダーの製造技術に依存する。原料の受入規格が存在し、入荷時に試験成績書が添付されるが、試験成績書に記載されていない物性のばらつきが製品の品質

に影響を与えるケースも多い。必要な情報としては、仕入先／製造元、原料規格、原料荷姿、原材料のコストおよび手配してから入荷するまでのリードタイム等である。

- ・製造

本業務に必要な情報としては、レシピを特定するレシピコード、レシピ名、バッチサイズ、設備要件、原材料所要量、製造工程、操作手順、運転条件およびその管理幅、運転条件の根拠、各計器における工程別警報設定値、工程所要時間及びその調節可否、レシピから外れた場合の対応措置、装置洗浄方法、ロット表記フォーマット等である。

- ・品質管理

本業務に必要な情報としては、工程分析／製品分析タイミングおよびその根拠、必要サンプル量、各分析方法、各規格値及びその管理幅、各規格値の根拠等である。

- ・出荷／ロジスティクス

本業務に必要な情報としては、顧客別出荷規格、ラベル記載内容、保管条件、輸送条件等である。

このように様々な情報に基づいて生産活動が行われており、その中の大半は製品固有の情報である。製品固有の情報は業務毎にマスター情報として管理されているケースが多く、製品情報の新規登録／改訂作業時に抜け／忘れの発生や類似情報を業務毎に繰り返し登録する際に、転記ミスが発生する等弊害が出ている。それゆえ「ものの作り方」に限らず製品固有情報は、レシピとして一元管理すべきであると言える。

つぎに、上述した様々な情報を生成するレシピ設計業務の現状を振り返る。レシピ設計頻度の高い機能商品の場合は、顧客から個別に品質の指定を受けてレシピ設計から実施するケースが多く、製品ライフサイクルも年々短くなってきているので、設計業務の迅速性および確実性が要求されている。しかしながら前述したようにレシピとして一元管理すべき情報が多くなるにつれてレシピ設計業務の負荷が高まっている状況にある。

迅速性という観点では、過去の経験、知見の量に依存すると考えられ、対象分野の熟練技術者が存在していれば、迅速に顧客要求品質を満足するレシピを設計することができる。そうでなければ遅くなるだけではなく対応できない可能性もある。

一方、確実性という観点では、マーケットや顧客要求品質、使用原料特性、製造環境等多くの不確定要素に取り巻かれた環境での設計業務になるため、開発担当者の能力に大きく依存するケースが多い。さらに、製品品質という結果のみが評価されレシピ自体の質を評価されることが少ないため、要求品質が実現された時点で業務が終了し、レシピ中の各設定の何が品質決定の主要因であるかが明確にされていないレシピになってしまっている。このことがレシピに規定されている手順および条件で製造しても、わずかな設定条件や原料品質の違いにより、製品品質や歩留まりや製造所要時間が安定せず、現場の操作で品質を作り込むケースが多く発生している大きな要因になっていると考えられる。このような状況を、製造に関わるすべての条件が必ずしもレシピに表現されていないという意味で、「レシピの不完全性」と呼ぶことにする。

以上述べてきた背景から本研究では、バッチプロセスを対象として、生産に関連する業務毎

に対して、外部要因やレシピの不完全性等から生じる不確定要素への対応機能を提案する。そしてその検討を通じて、不確定要素が取り巻く環境の中でも安定した生産活動を継続し、バッチプロセスの長所を最大限に発揮できるようなレシピ構造について考察を行う。

以降、バッチプロセスシステムに対する従来の取り組みについてレビューを行い、本研究の位置付けを確認していく。

1.2 スケジューリングに対する取り組み

従来バッチプロセスにおいてスケジューリングに関する研究は数多く実施されてきている。

Mauderli and Rippin²⁾、Reklaite³⁾は、品質を実現するための装置、工程、銘柄の組み合わせ数の多さおよび複雑さというバッチプロセスの構造上の問題、およびそれに関連して装置サイズや原材料、資材の在庫量の制約と受注量、納期の関係から、どの銘柄をいつ、どの装置を使用するかという資源割り当ての複雑さの問題を指摘し、バッチプロセス産業界での生産計画およびスケジューリング問題を解くことの難しさについて説明している。

その難しさに対応するために Egli and Rippin⁴⁾、Grau ら⁵⁾をはじめとする多数の研究者が、製品生産順序やバッチ開始時刻を決定するスケジューリングモデルを提案している。研究者毎に、銘柄切替や用役切替のコスト、夜間や土日における作業実施可否、同一プラントにおける共通原料の使用優先度、共有設備の競合回避、銘柄切替時の廃水量および製品毎の未反応モノマーや溶媒の回収量/時間等様々な制約条件を設定している。さらに、バッチサイクルを最短にすることや廃水量とエネルギー消費量を最小にするといった運転の最適化モデルも Birewar and Grossmann⁶⁾、Grau ら⁷⁾により提案されている。Pinto and Grossman⁸⁾は数理計画法のスケジューリングへの適用手法について整理している。その中で、バッチプラントの実行可能性を保証するために、不連続な資源使用状況を時間の経過とともに照合していく必要があることを述べている。これは本研究において、バッチプラントの工程進捗状況をモデル化する上で基本の考え方となっている。

現実には、前述したバッチプロセスの構造上の問題以外に、研究背景で述べたようなバッチプロセスを取り巻く環境に存在する不確定要素によってスケジューリング結果の信頼性が損なわれるだけでなく、製品品質や製造所要時間の変動が発生する。

バッチプロセスの運転における不確定性は古くから研究されている。Charnes and Cooper⁹⁾によって確率条件制約を用いた最適化手法が提案され、また Smith and Rude¹⁰⁾は、バッチプロセス変数の変動に着目し、その変動が与える影響をシミュレーションで示すことにより問題を提起した。このようにコンピュータが利用可能になる1960年代から不確定要素やバッチプロセスの変動という観点での研究が行われるようになり、これ以降多くの研究者がバッチプロセスを取り巻く不確定要素を含む変動をテーマにした研究に取り組んできている。研究の動向を眺めてみると、マーケットおよび設備の観点での不確定要素を対象としたテーマが多く取り上げられている。

1.2.1 マーケット及び設備における不確定要素に関する研究

オーダーの割り込みおよびキャンセルといったマーケットにおける不確定要素に関する研究として、Petkov and Maranas¹¹⁾は現時点と別の期間の対象設備の生産能力を比較し、現在以降の需要予測に対して、どのタイミングで生産すべきかを決定するための確率論的計画アルゴリズムを提案している。また、Méndez and Cerdá¹²⁾は、新規に受注した際、プラント運転の進捗状態に応じて初期スケジュールにおけるバッチ開始順序および装置割当の変更を許容する混合整数線形計画法を適用したリスケジューリング手法を提案している。さらに Kuroda ら¹³⁾は、ロバストなスケジュールを作成するために納期バッファを持たせて市場要求の不確定要素を吸収することを提案している。

機器故障等の設備における不確定要素に関する研究として、Sanmarti ら¹⁴⁾は、プラントの各設備に対して信頼性評価指標を設定し、信頼性の低い設備を極力使用しないようにスケジュールリングすることにより、設備トラブルによる不確定要素を削減してロバスト性を向上させることを提案している。そしてその後、バッチサイクルを最短にするスケジュールを生成するよりも設備の信頼性評価に基づいたロバスト性のあるスケジュール生成の方が効率的であることを示している (Sanmarti ら¹⁵⁾)。

マーケットと設備の両者の不確定要素を考慮した研究として Rotstein ら¹⁶⁾は、スケジュールの柔軟性と信頼性に対して、設備の信頼性と製品の需要分布に基づいた指標を定義している。また Bruccoli ら¹⁷⁾は、経済的な指標に基づいて最もロスの少ない装置構成に一時的に変更する措置方法について提案している。

Bassett ら¹⁸⁾は、バッチプロセスに内在する製造所要時間、設備の信頼性、収率、製品需要等の変動といった不確定要素を考慮してスケジュールリングするために、モンテカルロサンプリングを適用して不確定要素をランダムに発生させて各々の不確定要素を考慮したスケジュールを決定する枠組みを述べている。

1.2.2 不確定要素を考慮した最適化に関する研究

Mignon ら¹⁹⁾は、プロセスシミュレータとスケジューラを組み合わせたシステムを利用して、モンテカルロシミュレーションにより立案されたスケジュールのロバスト性を評価する枠組みを提案している。Rodrigues ら²⁰⁾は、将来発生すると予想される外乱に迅速に対応するために、STN(State Task Network)にて表現したスケジューリング問題に対して、低次元化した混合整数線形計画問題を繰り返し解いていく手法を提案している。

Orçun ら²¹⁾は、化学反応、人的要因、設備要因によって発生する単位操作時間、現場作業時間のばらつきを確率条件制約にてモデル化することにより不確定要素を表現することを提案している。そして、具体的に発酵プロセスを対象に運転員の作業時間、単位操作時間、生産量を不確定要素としてとらえ、そのばらつきを確率分布で表現し、リスクレベルという評価関数にて最適化スケジュールを作成する方法を提案している (Orçun ら²²⁾)。

Lin ら²³⁾や Janak ら²⁴⁾は、混合整数線形計画問題における目的関数の係数および不等式制約条件の係数に既知確率分布を適用してバッチプロセスにおける不確定要素を表現することによってロバストなスケジュールを生成する手法を開発した。

Lee and Malone^{25), 26)}は、キャンペーン間に製造しないダミーのバッチを割り当てて遅延時間を吸収し、次のキャンペーンに影響を与えないようにすることにより、マーケットやプラント運転における不確定要素に対応させる手法を提案している。また、納期遅れペナルティと早く生産した場合の在庫コスト、銘柄構成に依存する銘柄切替コストからなる目的関数に対して、モンテカルロシミュレーションとシミュレイトドアニーリングに基づいたスケジューリングの最適化法を提案している。

Sanmarti ら²⁷⁾は、多目的バッチプラントの生産スケジューリングを取り扱っている。製造工程をノード、工程間の関係をノード間の矢印で表現するスケジュールグラフを用いて、分枝限定法のアルゴリズムを適用している。

Glismann and Gruhn²⁸⁾は、ブレンディングプロセスにおける短期スケジューリングの調整方法として、Resource Task Network 表現に基づいた混合整数線形計画問題を解く最適化手法を提案している。

1.2.3 総論

本節ではスケジューリングに対する様々なアプローチについて概説した。いずれも様々な制約(たとえば、納期や生産量)のもとで、与えられた評価(たとえば生産量)の最適化を目的としており、その過程でのスケジュールの乱れについては、再スケジューリングを行うこと以外の操作は考えられていない。現実問題としてプラントで現場作業を実施している運転員は、生産スケジュールに基づいて作業段取りを行うので、スケジュールが乱れると混乱し作業の抜けやミスが発生しやすくなる。それゆえ現場作業者は、仮に工程の進捗が遅延したとしても、極力それ以降のスケジュールが変化しないように、処理時間の余裕等を利用して元のスケジュールに戻そうと努力している。

またバッチプロセスにおけるスケジューリングでは、装置、製造手順等のレシピ情報を使用しているが、過去の研究ではスケジューリング手法そのものにフォーカスし、レシピにフォーカスした内容の研究は少ない。現在、様々なスケジューラが市販されているが、いずれもレシピ管理とは独立したパッケージになっており、レシピとして管理すべき情報をシステムのマスター情報という位置付けでスケジューラ側に登録しているのが現状である。それゆえ、新規銘柄の追加や既存銘柄のレシピ改訂時の業務が煩雑になる要因の一つとなっている。これは、加工組立プロセスを対象に開発されたスケジューラが主流になっており、バッチプロセスを対象としたスケジューラが少ないということの表れと言える。

今後スケジューリング分野では、系統的にレシピと関連付けることによってスケジューリング業務の効率化を実現していくとともに、進捗が遅延することを想定してスケジュールを元に戻すことを意識したスケジューリング手法の確立が必要であると考えられる。

1.3 運転管理及び運転支援に対する取り組み

バッチプロセスでは、各バッチがスケジュール通りに進捗することを前提に業務が取り進められている。しかしながら実際には、様々な外乱要素によってスケジュール通り進捗しないことが多い。それゆえ、工場の安定操業を実現するためにはスケジュールの進捗状況をチェック

しながら運転を調整することが重要となる．このような背景から、リアクティブスケジューリングをテーマとする論文が多く報告されている．また一般にバッチプロセスでは運転途中で品質状態を把握することが困難であるため、異常検知、品質推定といったプロセスモニタリング機能を適用した運転支援をテーマにした論文も多い．

1.3.1 工程進捗管理

前段が反応工程や溶解工程等のバッチプロセスで、バッファタンクを介して後段プロセスが乾燥工程や精製工程等の連続プロセスで構成されるプラントは多い．このようなプラントでは、バッチプロセスの進捗状態に応じて連続プロセスのロードを調整したり、銘柄切替のタイミングを予測して連続プロセス側のスタートアップ準備を行ったりしている．逆に、連続プロセス側の状況に応じてバッチプロセス側の開始時刻を調整している．それゆえ、バッチプロセスの釜数が多いプラントや複数のバッチプロセス系列で連続プロセスを共有しているプラントでは運転管理が煩雑となる．このような課題に対して Onogi ら²⁹⁾は、ダイナミックシミュレータと自動スケジューラを用いて、現在のプロセス状態量から連続プロセスの終了時刻を予測して次の連続プロセスの開始時刻を修正するシステムを提案している．

プロセスの処理時間のばらつき等の要因により初期スケジュールに対してズレが発生した場合のスケジュール修正に関する研究も多くなされている．Cott ら³⁰⁾は、処理時間の変動やバッチサイズの変動に対して、オンラインモニタリングと連携したスケジュール修正アルゴリズムを紹介している．

Tomita ら³¹⁾、Fujimura ら³²⁾、³³⁾は、戦略に基づく自動スケジューリングの結果に対し、人的負荷や消費電力量、在庫量などのシミュレーション結果を基に妥当性を検討し、人間によるスケジュール案修正と再スケジューリングを交互に繰り返すことにより最適解に近づけていくシステムを紹介している．Henning and Cerda³⁴⁾は、熟練者の知識ベースを利用したリアクティブスケジューリング手法を提案している．

Huercio ら³⁵⁾は、ヒューリスティックルールに基づいて工程開始時刻や使用装置割り当ての変更を実施し、運転中の外乱によって発生する上位の生産スケジューリングと下位のシーケンス制御との間のギャップをリアルタイムに埋めるスケジュール生成手法を提案している．

Ishii and Muraki³⁶⁾は、現在のプロセス状態から各工程の終了時刻を予測し現在時刻以降の各使用装置の処理開始時刻をオンラインで調整していくシステムを提案している．

同様に河野³⁷⁾、³⁸⁾は、現在のプロセス状態から現在時刻以降の各使用装置の処理開始時刻をオンラインで調整する工程進捗管理システムを開発し、その運転員へのインタフェースとしてリアルタイムガントチャート画面および現場作業リストとその実施タイミングのガイダンス画面を樹脂製造バッチプラントに適用した事例を紹介している．また Wang ら³⁹⁾は、遺伝アルゴリズムによるオンラインスケジューリングを樹脂製造バッチプラントに適用した事例を紹介している．

Honkomp ら^{40), 41)}は、プロセスシミュレータを用いて、あらかじめ構築したモデルと運転実績とを比較し、過去の実績の標準偏差を超えたばらつきが発生した場合に、モデルを修正して再スケジュールするという決定論的モデルと確率論的モデルを組合せたりアクティブスケジュールリングの手法を提案している。また、現実問題として経験則が必要になってくるためスケジュールリングの最適化が難しいことも述べている(Honkomp ら⁴²⁾)。

Puigjaner and Romero⁴³⁾は、運転状況に応じて柔軟にレシピを変更するとともに、変更されたレシピにより変化する単位操作時間に基づいて再スケジュールリングを実施する Flexible Recipe Model の考え方とその適用事例を紹介している。

Kanakamedala ら⁴⁴⁾は、バッチプロセスの運転を早く完了させていくことよりも遅延が発生した以降のバッチへの影響を最小にすることの方が良いことをシミュレーションにより示している。

1.3.2 品質の観点からの運転支援

近年はレシピ設計時に不確定要素を削減していくのではなく、運転員の経験に基づいたエキスパートシステムにより運転中に発生する不確定要素へ対応するアプローチや、製造実績を多変量解析して品質モデルを構築することによりバッチ毎に製造条件を調整していくというアプローチに関する論文が多く発表されている。

Rao and Corbin⁴⁵⁾は、運転員が保有する知見をヒヤリングして構築したエキスパートシステムと反応モデルを知識ベースとする知的運転支援システムをパルプ製造プロセスに適用した事例を紹介している。Cowling⁴⁶⁾は、予期せぬ事象が発生しやすい製鉄所のローリングミル工程にタブーサーチを適用した意思決定支援システムを紹介している。Ündey ら⁴⁷⁾は、Gensym 社製のAIツールである「G2」上にプロセスや品質に関する推論ルールを定義したリアルタイム知識ベースシステムと多変量統計解析手法の一つである Multi-way partial least squares に基づいた異常検知機能を統合したリアルタイムモニタリングシステムを提案している。

Martin ら⁴⁸⁾は、多変量解析を用いたプロセスコントロールによって製造性能を向上させる手法についてレビューしている。そして Zheng ら⁴⁹⁾は、バッチプロセスにおける Run to Run Control のコントロール性能に関して、プラントモデルを構築する場合と製品毎にモデルを構築する場合を比較し、製品毎にモデルを構築してコントロールする方が優れていることをシミュレーションにて示している。

品質制御の観点では、アルキド樹脂製造プロセス(Verwater-Lukszo⁵⁰⁾)や酸化チタンを主原料とする顔料製造プロセス(Šel ら⁵¹⁾)、ナイロン 6,6 製造プロセス(Kaistha ら⁵²⁾)にそれぞれレシピモデルベースの品質制御を適用した事例が紹介されている。また Curt ら⁵³⁾は、バッチ毎に各サンプリング時のプロセス状態量と品質を多変量解析してバッチ完了時の品質を予測し、ファジー関数化した運転員の知見と組み合わせてプロセスに対する制御量を決定する品質制御手法を提案している。同様に鉄鋼の分野では Kano ら^{54), 55)}が製品品質と操業条件を結び付ける統計モデルを構築

し、表面疵や内部欠陥を抑制し、製品歩留りを改善するための操業条件を導出するシステムを開発している。

1.3.3 総論

製造に関わるすべての条件が必ずしもレシピに表現されていない現状を考えると、レシピで規定されている条件、手順で製造しているにもかかわらず目標品質を得るための所要時間が変動することは避けられない。所要時間が変動すれば元のスケジュールに対してずれが生じて、製造部門のみならず、原料を手配する購買部門や製品を出荷する物流部門、さらには営業部門にも影響を与えることになる。

従来の研究では進捗状態に合わせて現時点以降のスケジュールを自動的に再作成することや乾燥や精製、回収工程のロードを自動調整すること、また、品質に関するソフトセンサーやプロセスの異常検知等のオンラインモニタリング機能による運転条件を調整することをテーマにした論文は多く発表されているが、前節でも述べたように遅延したスケジュールを元に戻すように工程の進捗をコントロールするという概念の取り組みはなされていなかった。製造現場の運転員だけでなく工場の業務に携わる人にとってスケジュールは作業の指標となるものなので頻繁に変えるべきではないと考えられる。

このような背景から、初期スケジュールを維持するように進捗をコントロールする機能について研究することは意義があると考えられる。さらにこの時間的変動はレシピの不完全性に起因する製品品質の変動やプロセス変動と関連するケースが多いので、品質に関するソフトセンサー、プロセスの異常検知等のオンラインモニタリング機能についての研究だけでなくレシピそのものの不完全性やレシピ中の各種パラメータの不確定性を削減していく研究がますます重要かつ必要であると考えられる。

1.4 レシピ設計に対する取り組み

レシピはバッチプロセスにとって人間の遺伝子に相当するものであり、レシピに問題があればバッチプロセスは正しく機能しない。それゆえ、前節まで述べてきたスケジューリングの工夫や運転支援は表面的な課題に対する対応であり、レシピが抱える問題を解決しない限り本質的な対応にはならないと考えている。レシピ設計では、原材料/溶媒選択及びその所要量、装置要件、製造工程/操作手順、操作条件等を決定する必要がある。

原料の決定には経験と熟練が必要であるが、Muteki ら^{56) 57)}は樹脂コンパウンド製品に対して原料と樹脂特性の関係を表現する統計モデルを構築することにより、勘と経験に依存していた配合設計業務からシステムティックな業務に変えていくことを試みている。

運転条件の決定における要素技術として Kano⁵⁸⁾らは、独立成分分析と主成分分析を組み合わせた影響度解析手法を提案している。

操作手順を決定する際、例外処理のシーケンス作成およびその検証は手間の掛かる作業であるが、Music and Matko⁵⁹⁾はレシピプロシジャに則ってシーケンシャルに単位操作が実施され

るバッチプロセスに様々な外乱を想定したシーケンスの検証ができるようなシミュレーションツールを提案している。これは、外乱という不確定要素を想定内の現象に変えていくツールと見なせる。また Aoyama ら⁶⁰⁾、Gabbar ら⁶¹⁾は、マスターレシピとプラント構造からコントローラレシピを自動的に生成するツールについて提案している。これは、インベントリとゲートという物理的な基本概念とプラント構造という根拠のある知識を活用して、運転手順を設計する際に不確定要素を削減するツールと見なすことができる。

運転条件を決定する際、設計段階ではかなり不確定要素を含んだ内容になるケースが多い。Ahmed and Sahinidis⁶²⁾は、不確定要素を設計段階における設計変数と運転段階における制御／操作変数の二つのステージに分けて、NPV (Net Present Value) を最大化するように変数を選択する考え方の有効性を示している。さらに Liu and Sahinidis⁶³⁾は、NPV を最大化する変数の探索に使用するモデルとしてファジーモデルと確率モデルとを比較しており、コンピュータのCPU負荷を軽減するという観点では確率モデルの方が有効であると述べている。

また Verwater-Lukszo⁵⁰⁾がアルキド樹脂製造プロセスの品質制御事例の中で提案している Flexible Recipe Improvement System は、蓄積された運転実績を活用して製品品質と製造条件との関係を統計モデルで表現し、レシピのフォミュラの精度を向上させていくという観点でレシピ設計ツールと見なせる。

Mošat' ら⁶⁴⁾は、不確定要素を多く含んだ初期レシピに対してモンテカルロシミュレーションとラテン超方格サンプリングを用いたタブーサーチ最適化により生産性とロバスト性の両者を最大化するレシピ設計手法について紹介している。

このように、十数年前からレシピに内在する不確定要素を減らすアプローチが提案されてきている。

一般に原料ベンダーは試作品を顧客に提供し、顧客が品質評価を行う。この品質評価結果は、顧客が使用する他の原料特性や製造条件に依存する。しかし、これらの情報が原料ベンダーには開示されずに評価結果のみが伝えられ、原料ベンダーは極めて不確定性の高い状況下で製品を製造するためのレシピを設計しなければならない業界がある。このように具体的な目標品質情報が無い製品を対象としたレシピ設計に対するアプローチは、まだなされていない。サプライチェーンの川中企業に位置する原料ベンダーにはこのような業界が多く、新たなレシピ設計手法の開発が必要であると考えられる。

1.5 レシピ設計業務マネジメントに対する取り組み

前節では、レシピ設計そのものに対するアプローチについて述べてきたが、設計手法だけでは不確定要素を排除するには限界があり、設計業務のマネジメントにも踏み込んで工夫していく必要があると考えられる。すなわち、過去の知見や他業務の成果をレシピ情報にうまく活用して、効率良く設計業務を取り進めていく仕組みを開発するということである。

いろいろな分野の技術者が多く集まっている企業でもプロジェクトごとに縦割り組織で運営されている場合は、

- ・ テーマ毎にあらかじめ人役が割り当てられている
- ・ 顧客からのテーマの場合、秘密保持の関係で組織内での情報交換ができない

という制約のため、組織としての総合力を発揮できないケースが多い。これは、各業務の能力や経験の蓄積といった組織力向上の観点でのマネジメントが行われなため、熟練者の勘と経験が組織力として蓄積されずに属人的な業務となってしまうことが要因と考えられる。また、ここ数年 2007 年問題および 2010 年問題として話題になっているように、製造業全般において運転員や技術者の世代交代の時期にさしかかっており、熟練者が退職することによる製品品質の低下や新製品開発力の低下が懸念されている。熟練運転員はその日の製造環境からマスターレシピとのズレを五感で把握し、経験を駆使してレシピを修正している。特に樹脂のコンパウンド、色材業界では職人技となっている。製品品質の作り込みが熟練運転員に委ねられている現状を改善することが必要である。

Kim ら⁶⁵⁾は、資源制約マルチプロジェクト計画問題におけるヒューリスティックな枠組みを示し、エキスパートシステムをマルチプロジェクトスケジューリングの分野で開発していく戦略を述べている。現実のスケジューリング問題は、多様かつ干渉し合う目標に影響される。膨大な組み合わせ数や非現実的な仮定により、PERT (Program Evaluation and Review Technique)、CPM (Critical Path Method) のような従来の管理技術では取り扱えるスケジューリング問題に限られてくる。Balasubramanian and Grossmann⁶⁶⁾は、フローショップスケジューリングと新製品開発業務スケジューリングに対してファジー理論を用いると混合整数線形計画モデルでも実用的な時間で計算可能であること、そして、さらに大きな問題に対してはタブーサーチを適用することを提唱している。

芝尾⁶⁷⁾、Gongyi and Yokoyama⁶⁸⁾、二宮⁶⁹⁾が提案しているように不確定要素を削減するためにレシピ設計業務のマネジメントを工夫するアプローチも産業界にて検討され始めている。また Roussel⁷⁰⁾は、技術開発プロジェクトの難易度を既存技術と比較することによりリスク評価する手法について述べている。

機械設計の分野であるが、藤本ら⁷¹⁾は、設計プロセスのモデル化手法であるRDC (Require Define Confirm) によって設計要素における不確実性の定量化を試みている。

Shah ら⁷²⁾は、エンドユーザに難しい数式モデルを意識させることなくエンジニアリングができるようなユーザインタフェースを有したソフトウェアパッケージの統合環境を提案し、Book and Bhatnagar⁷³⁾は、国際規格 ANSI/ISA-S88.01¹⁾をベースにした化学プラントにおける生産計画およびスケジューリング向けの情報モデルを提案しており、設計環境に関する研究も実施されている。

開発リードタイムの短縮を目的にサプライチェーン・カウンシル⁷⁴⁾からは製品開発業務プロセスモデルとしてDCOR (Design Chain Operations Reference Model) が提案されている。Fuchino ら⁷⁵⁾は、レシピ設計の業務モデルをIDFO (Integration DEfinition for Function Model) で表記することを試みている。

製造業において、厳しい競争に勝ち残るためには顧客満足度をさらに向上させていく必要がある。それゆえ今後いっそう不確定要素の少ないレシピを迅速に設計し顧客要求から顧客への

提供までのリードタイムを短縮するマネジメントが重要となり、その手法を開発することは意義のあることと考えられる。

1.6 本論文の構成

本論文は、今後ますます高付加価値化かつ多様化する機能化学品分野において重要視されるバッチプロセスの性能を不確定要素が取り巻く環境の中でも最大限に発揮できるようにすることを目指し、不確定要素に対応する機能の開発およびそれに適したレシピ構造の検討を目的とする。本論文は6つの章から構成される。以下にその概略を記す。

第1章では本研究を実施するに至った背景の説明および本研究分野に関して国内外の研究者がアプローチしてきた内容に関するレビューを行っている。

第2章では、生産計画/スケジューリング業務という切り口で、不確定要素への対応手法に関する提案を行う。様々な不確定要素のためにレシピで規定されている条件や手順で製造しているにもかかわらず、目標品質を得るための所要時間が変動することは避けられないという前提で、運転上現れてくる単位操作所要時間の生産スケジュール作成時からの変動に着目する。そして、そのような生産スケジュールに対する外乱を極力抑制するために、単位操作所要時間をコントロールすることも加味したバッチ間のバッファ時間を組み込んだ、初期スケジュール作成法について提案する。

第3章では、バッチプロセスオペレーションという切り口で、不確定要素への対応手法に関する提案を行う。具体的には、バッチプラント運転中に工程進捗遅延が発生した際の遅延復旧ガイダンス提供システムを提案する。第2章の提案手法は、生産スケジュール立案時にオフラインで利用するための手法であり、運転開始後実際に遅延が発生した場合にどのように対処すべきかについての具体的な方法は示していない。そこで本章では、第2章で提案した手法で立案されたスケジュールで運転されているバッチプロセスにおいて、遅延発生時の状況に応じた戦略を設定することにより進捗管理に柔軟性を持たせるとともに、遅延発生時の復旧方法に関する具体的な対処方法をオンラインで運転員に提示する運転支援システムを提案する。

第4章では、レシピ設計業務という切り口で、現状のレシピの不完全性への1つの対応手法に関する提案を行う。ここでは、不確定性の高い環境下においてもシステマティックにレシピ設計が行えるようにするために、製造条件に対する製品品質モデルを内在させたモデル埋め込みレシピの構造を提案する。

具体的には、これまで蓄積された試作レシピとその客先評価結果を多変量解析し、原料配合比率から不良品発生率を予測するモデルを構築すると共に、独立成分分析に基づいて解析した製品成分の品質に対する影響度を指標にしてシステマティックに原料配合比率を改良するレシピ設計手法を提案する。そして、熟練技術者の勘と経験に依存した業務になっている現実の樹脂コンパウンドメーカーの樹脂着色剤のレシピ設計を対象に、提案したレシピ設計手法を組み込んだレシピ構造の有用性を検証する。

第5章では、レシピ設計業務のマネジメントという切り口で、レシピの不完全性や不確定要素への対応手法に関する提案を行う。システムティックに業務改善に取り組むことができるように、アクティビティモデリング手法であるIDEF0にてレシピ設計の業務プロセスモデルを提案する。さらに、各業務内容の確からしさ、すなわち、どの程度根拠のある検討ができたかという観点で確信度という指標を定義する。そして、この確信度を利用して設計課題ごとの現状レベルを個々に評価し、さらにシミュレーションによって総合力を評価することで、管理者が効率的にレシピ設計業務を進めることのできる意思決定支援手法を提案する。

最後に、第6章は本論文のまとめであり、本研究の成果を整理するとともに、バッチプロセスを取り巻く不確定要素に対応していくためのレシピ構造のあるべき姿として製造実績や経験をモデルとして埋め込んだ「モデル埋め込みレシピ」の有効性について考察する。

参考文献

- 1) ANSI/ISA-S88.01; "Batch Control, Part1; Models and Terminology", ANSI/ISA-S88.01; pp.27-43 (1995)
- 2) Mauderli, A and S.W.T. Rippin; "Production Planning and Scheduling for Multi-Purpose Batch Chemical Plants", Computers chem. Engng. Vol.32, pp.199-106 (1979)
- 3) Reklaites, G.V.; "Scheduling Approaches for the Batch Process Industries", ISA Transactions 34, pp.349-358 (1995)
- 4) Egli, U.M. and S.W.T. Rippin; "Short-Term Scheduling for Multi-Product Batch Chemical Plants", Computers chem. Engng. Vol.10, No.4, pp.303-325 (1986)
- 5) Grau, R., A. Espuña and L. Puigjaner; "Focusing in By-Product Recovery and Waste Minimization in Batch Production Scheduling", Computers chem. Engng. Vol.18, Suppl., pp.S271-S275 (1994)
- 6) Birewar, D.B. and I.E. Grossmann; "Efficient Optimization Algorithms for Zero-Wait Scheduling of Multi-product Batch Plants", Ind. Eng. Chem. Res. Vol.28, No.9, pp1333-1345 (1989)
- 7) Grau, R., M. Graells, J. Corominas, A. Espuna and L. Puigjaner; "Global Strategy for Energy and Waste Analysis in Scheduling and Planning of Multiproduct Batch Chemical Processes", Computers Chem. Engng. Vol.20, No.6/7, pp.853-868 (1996)
- 8) Pinto, J.M. and I.E. Grossmann; "Assignment and Sequencing Models for the Scheduling of Process Systems", Annals of Operations Research, 81, pp.433-466 (1998)
- 9) Charnes, A and W.W. Cooper, "Deterministic Equivalents for Optimizing and Satisficing Under Chance Constraints", Operations Research, Vol.11, pp.18-39 (1963)
- 10) Smith, N.H. and D.F. Rudo; "On the Effects of Batch Time Variation on Process Performance", Chemical Engineering Science, Vol.19, pp.403-411 (1964)
- 11) Petkov, S.B. and C.D. Maranas; "Multiperiod Planning and Scheduling of Multiproduct Batch Plants under Demand Uncertainty", Ind. Eng. Chem. Res., VOL.36, pp.4864-4881 (1997)
- 12) Mèndez, C.A. and J. Cerdà; "Dynamic Scheduling in Multiproduct Batch Plants", Computers chem. Engng. Vol.27, pp.1247-1259 (2003)
- 13) Kuroda, M., H. Shin and A. Zinnohara; "Robust Scheduling in an Advanced Planning and Scheduling Environment", Int. J. Prod. Res., VOL.40, No.15, pp.3655-3668 (2002)
- 14) Sanmarti, E., A. Espuna and L. Puigjaner; "Effects of Equipment Failure Uncertainty in Batch Production Scheduling", Computers chem. Engng. Vol.19, Suppl., pp.S565-S570 (1995)
- 15) Sanmarti, E., A. Huercio, A. Espuna and L. Puigjaner; "A Combined Scheduling / Reactive

- Scheduling Strategy to Minimize the Effect of Process Operations Uncertainty in Batch Plants", *Computers chem. Engng.* Vol.20, Suppl., pp.S1263-S1268 (1996)
- 16) Rotstein, G.E., R. Lavie and D.R. Lewin; "Synthesis of Flexible and Reliable Short-Term Batch Production Plans", *Computers chem. Engng.* Vol.20, No.2, pp.201-215 (1996)
- 17) Bruccoleri, M, Z.J. Pasek and Y. Koren; "Operation Management in Reconfigurable Manufacturing Systems : Reconfiguration for Error Handling", *Int. J. Production Economics* Vol.100, pp.87-100 (2006)
- 18) Bassett, M.H., J.F. Pekny and G.V. Reklaitis; "Using Detailed Scheduling To Obtain Realistic Operating Policies for a Batch Processing Facility", *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol.36, pp.1717-1726 (1997)
- 19) Mignon, D.J., S.J. Honkomp, and G.V. Reklaitis; "A Framework for Investigating Schedule Robustness Under Uncertainty", *Computers chem. Engng.* Vol.19, Suppl., pp. S615-S620 (1995)
- 20) Rodrigues, M.T.M, L. Gimeno, C.A.S. Passos and M.D. Campos; "Reactive Scheduling Approach for Multipurpose Chemical Batch Plants", *Computers chem. Engng.* Vol.20, Suppl., pp. S1215-S1220 (1996)
- 21) Orçun, S., I.K. Altinel and O. Hortacsu; "Scheduling of Batch Process with Operational Uncertainties", *Computers chem. Engng.* Vol.20, Suppl., pp.S1191-S1196 (1996)
- 22) Orçun, S., S. Clark and G. Joglekar; "An Iterative Optimization Simulation Approach to Identify Risk Parameters for Scheduling under Uncertain Processing Conditions", *AIChE2001 Annual Meeting, Batch Plants Overview*, November 4-9 (2001)
- 23) Lin, X., S.L. Janak and C.A. Floudas; "A New Robust Optimization Approach for Scheduling Under Uncertainty: I. Bounded uncertainty", *Computers Chem. Engng.* Vol.28, pp.1069-1085 (2004)
- 24) Janak, S.L., X. Lin and C.A. Floudas; "A New Robust Optimization Approach for Scheduling Under Uncertainty II. Uncertainty with Known Probability Distribution", *Computers chem. Engng.* Vol.31, pp.171-195 (2007)
- 25) Lee, Y.G. and M.F. Malone; "Batch Process schedule optimization under parameter volatility", *INT. J. PROD. RES.*, VOL.39, No.4, pp.603-623 (2001)
- 26) Lee, Y.G. and M.F. Malone; "A General Treatment of Uncertainties in Batch Process Planning", *Ind. Eng. Chem. Res.*, VOL.40, pp.1507-1515 (2001)
- 27) Sanmarti, E., F. Friedler and L. Puigjaner; "Combinatorial Technique for Short Term Scheduling of Multipurpose Batch Plants Based on Schedule-graph Representation", *Computers chem. Engng.* Vol.22, Suppl., pp.S847-S850 (1998)
- 28) Glismann, K and G. Gruhn; "Short-term Scheduling and Recipe Optimization of Blending

- Processes", Computers chem. Engng. Vol.25, pp.627-634 (2001)
- 29) Onogi, K., Y. Nishimura, Y. Nakata and T. Inomata; "An On-line Operating Control System for A Class of Combined Batch/Semicontinuous Processes", J. Chem. Eng. Jpn., Vol.19, No.6, pp.542-548 (1986)
- 30) Cott, B.J. and S. Macchietto; "Minimizing the Effects of Batch Process Variability Using Online Schedule Modification", Computers Chem. Engng. Vol.13, No.1/2, pp.105-113 (1989)
- 31) Tomita, S, S. Fujimura and R. Himono; "A Production Scheduling System for Batch Plant – The Problems for Practical Use and the Verification by the Field Test in a Real Plant –", T.SICE Vol.29, No.7, pp843-850 (1992)
- 32) Fujimura, S., H. Mitake, S. Tomita and K. Takahashi; "Practical Functions of a Scheduling System for Plant Operations", T.SICE Vol.31, No.7, pp923-932 (1995)
- 33) Fujimura, S. and R. Himono; "Unified Recipe Information Management for Batch Process Control and Scheduling", T. IEE Japan, Vol. 122-C, No.5, pp.843-850 (2002)
- 34) Henning, G.P. and J. Cerda; "Knowledge-based Predictive and Reactive Scheduling in Industrial Environments", Computers and Chemical Engineering 24, pp.2315-2338 (2000)
- 35) Huercio, A., A. Espuna and L. Puigjaner; "Incorporating On-line Scheduling Strategy in Integrated Batch Production Control", Computers chem. Engng. Vol.19, Suppl., pp.S609-S614 (1995)
- 36) Ishii, N. and M. Muraki; "A process-variability-based Online Scheduling System in Multi-product Batch Process", Computers chem. Engng, Vol.20, No.2, pp. 217-234 (1996)
- 37) Kawano, K.; "The Operation Support System for Batch Processes", World Batch Forum 97 (1997)
- 38) Kawano, K.; "Application of Batch Progress Prediction by Rolling Scheduling to Operation Support System", World Batch Forum 98 (1998)
- 39) Wang, K., T. Lohl, M. Stobbe and S. Engell; "A Genetic Algorithm for Online-scheduling of A Multi-product Polymer Batch Plant", Computers and Chemical Engineering 24, pp.393-400 (2000)
- 40) Honkomp, S.J., L. Mockus and G.V. Reklaitis; "Robust Scheduling with Processing Time Uncertainty", Computers chem. Engng, Vol.21, No.21, Suppl., pp. S1055-S1060 (1997)
- 41) Honkomp, S.J., L. Mockus and G.V. Reklaitis; "A Framework for Schedule Evaluation with Processing Uncertainty", Computers chem. Engng. Vol.23, pp.595-609 (1999)
- 42) Honkomp, S.J., S. Lombardo, O. Rosen and J.F. Pekny; "The Curse of Reality - Why Process Scheduling Optimization Problems Are Difficult in Practice", Computers and

- Chemical Engineering 24, pp.323-328 (2000)
- 43) Puigjaner, L. and J. Romero; "Batch and Hybrid Processes", Computer Aided Product Engineering, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., pp.591-619 (2006)
- 44) Kanakamedala, K.B., G.V. Reklaitis and V. Venkatasubramanian; "Reactive Schedule Modification in Multipurpose Batch Chemical Plants" Ind. Eng. Chem. Res. 33, pp77-90 (1994)
- 45) Rao, M. and J. Corbin; "Intelligent Operation Support System for Batch Chemical Pulping Process", Engng Applic. Artif. Intell. Vol.6, No.4, pp.357-380 (1993)
- 46) Cowling, P; "A Flexible Decision Support System for Steel Hot Rolling Mill Scheduling", Computers & Industrial Engineering Vol.45, pp307-321 (2003)
- 47) Üendy, C., E. Tatara and A. Çinar; "Real-time Batch Process Supervision by Integrated Knowledge-based Systems and Multivariate Statistical Methods", Engineering Applications of Artificial Intelligence Vol.16, pp555-566 (2003)
- 48) Martin, E.B., A.J. Morris and C. Kiparissides; "Manufacturing Performance Enhancement Through Multivariate Statistical Process Control", Annual Reviews in Control. Vol.23, pp.35-44 (1999)
- 49) Zheng, Y., Q. Lin, D. S. Wang, S. Jang and K. Hui; "Stability and Performance Analysis of Mixed Product Run-to-run Control", Journal of Process Control Vol.16, pp431-443 (2006)
- 50) Verwater-Lukszo, Z; "A Practical Approach to Recipe Improvement and Optimization in the Batch Processing Industry", Computers in Industry Vol.36, pp.279-300 (1998)
- 51) Šel, D., N.Hvala, S. Strmčnik, S. Milanič and B. Šuk-Lubej; "Experimental Testing of Flexible Recipe Control Based on a Hybrid Model", Control Engineering Practice Vol.7, pp.1191-1208 (1999)
- 52) Kaistha, N., M.S. Johnson, C.F. Moore and M.G. Leitnaker; "Online Batch Recipe Adjustments for Product Quality Control Using Empirical Models : Application to a Nylon-6,6 Process", ISA Transactions Vol.42, pp.305-315 (2003)
- 53) Curt, C., J. Hossenlopp and G. Trystram; "Control of Food Batch Processes Based on Human Knowledge", Journal of Food Engineering Vol.79, pp.1221-1232 (2007)
- 54) Kano, M., K. Fujiwara, S. Hasebe and H. Ohno; "Data-Driven Approach for Product Quality/Yield Improvement: How to Specify Target of Qualitative Quality Variables", SICE Journal of Control, Measurement and System Integration, Vol.42, No.8, pp.902-908 (2006)
- 55) Kano, M. and Y. Nakagawa; "Data-Based Process Monitoring, Process Control and Quality Improvement :Recent Developments and Applications in Steel Industry", Computers & Chemical Engineering, Vol.32, No.1-2, pp.12-24 (2008)

- 56) Muteki, K., J. F. Macgregor and T. Ueda; " Estimation of missing data using latent variable methods with auxiliary information, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, IN PRESS, Corrected Proof (2005)
- 57) Muteki, K., J. F. Macgregor and T. Ueda: " On the Rapid Development of New Polymer Blends– The Optimal Selection of Materials and Blend Ratios, Ind. Eng. Chem. Res. Vol.45, No.3, pp4653-4660 (2006)
- 58) Kano, M.,Y. Mukai and S. Hasebe; " How to Estimate True Effect of Changing Operating Condition on ProductQuality: ICA-Based Approach ",19th European Symposium on Computer Aided Process Engineering(ESCAPE19), 1015-1019, Cracow, Poland, June 14-17 (2009)
- 59) Music, G and D. Matko; "Simulation Support for Recipe Driven Process Operation", Computers chem. Engng. Vol.22, Suppl., pp.S887-S890 (1998)
- 60) Aoyama, A., I. Yamada, R. Batres and Y. Naka; "Multi-dimensional Object Oriented Approach for Automatic Generation of Control Recipes", Computers chem. Engng. Vol.24, pp.519-524 (2000)
- 61) Gabbar, H.A., A. Aoyama and Y. Naka; "Automated Solution for Control Recipe Generation of Chemical Batch Plants", Computers chem. Engng. Vol.29, pp.949-964 (2005)
- 62) Ahmed, S. and N.V. Sahinidis; " Robust Process Planning under Uncertainty ", Ind. Eng, Chem. Res. Vol.37, pp.1883-1892 (1998)
- 63) Liu, M.L. and N.V. Sahinidis; "Optimization in Process Planning under Uncertainty", Ind. Eng. Chem. Res., VOL.35, pp.4154-4165 (1996)
- 64) Mořat , A, U. Fischer and K. Hungerbühler; " Multi-objective Batch Process Design Aiming at Robust Performances ", Chemical Engineering Science Vol.21, pp.6015-6031 (2007)
- 65) Kim, S.O. and M.J. Schniederjans; " Heuristic Framework for The Resource Constrained Multi-Project Scheduling Problem ", Computers Operations Research Vol.16, No.6, pp541-556 (1989)
- 66) Balasubramanian, J. and I.E. Grossmann; "Scheduling Optimization under Uncertainty - An Alternative Approach", Computers chem. Engng. Vol.27, pp.469-490 (2003)
- 67) Shibao, Y.; " The Purpose of Project Planning and Evaluation in the Organization " , Journal of the Society of Project Management Vol.9, No.3, pp.15-19 (2007)
- 68) Gongyi, L. and S. Yokoyama; " Proposal of Requirement Definition Method to Support Stake Holder ' s Communication of Project Planning " , Journal of the Society of Project Management Vol.9, No.3, pp.20-26 (2007)
- 69) Ninomiya, K.; " Innovation and Management " , Operations Research pp.254-259 (2008)
- 70) Roussel, P.A.; " Cutting down the guesswork in R&D " , Harvard Business Review, September-October 1983,pp.154-160 (1983)

-
- 71) Fujimoto, S., T. Nakazawa and H. Masuda; "Study of Uncertainty on Engineering Design for the Improvement of Engineering Process Quality", The Japan Society of Mechanical Engineers (2006)
- 72) Shah, N., K. Kuriyan, L. Liberis, C.C. Panterides, L.G. Papageorgiou and P. Riminucci; "User Interfaces for Mathematical Programming Based Multipurpose Plant Optimization Systems", Computers chem. Engng. Vol.19, Suppl., pp.S765-S772 (1995)
- 73) Book, N.L. and V. Bhatnagar; "Information Models for Planning and Scheduling of Chemical Process", Computer and Chemical Engineering Vol.24, pp.1641-1644 (2000)
- 74) <http://www.supply-chain.gr.jp>
- 75) Fuchino, T., T. Kitajima, Y. Shimada, K. Takeda, S. Hashizume, T. Hamaguchi, R. Batres, K. Kawano, A. Yamada and Y. Hashimoto; "Recipe Informatics to Shorten the Lead Time from Product Development to Production in Batch Processes", Proceedings of PSE/ESCAPE 2006, pp.2225-2230 (2006)

第2章

処理時間の変動を考慮したバッチプロセスにおける

バッチ間バッファ時間設定方法

一般にバッチプロセスでは、プロセス上のトラブル、原料品質のばらつきなどにより、各単位操作の処理時間は変動する。このような変動は、次バッチ以降のバッチの開始時刻に影響を与え、運転員に対しては作業タイミングのずれや作業順序の変更により予定外の作業負荷となる。これは、ヒューマンエラーを誘発するだけでなく、原料手配、検査、出荷等の関係業務にも影響を与え、運転管理上対応策を検討すべき課題の1つとなっている。従来、このような変動に対しては、バッチ間にバッファ時間を持つことにより対処してきたが、その与え方の根拠は明確ではなかった。そこで本章では、変動対応策としてのバッチ間のバッファ時間のシステムティックな決定法を提案する。

まずスケジュールが与えられた時、ある装置の処理の遅れがその時刻以降のスケジュールに与える影響について検討する。そして、予め定めた範囲の遅れに対して、予め定めたバッチ数以内でその遅れを吸収できるようなバッチ間のバッファ時間の定め方を提案する。さらに、生産機会重視、ヒューマンエラー防止重視、用役コスト重視などの様々な戦略により、特定の処理時間が短縮可能という条件下で処理時間の変動を吸収するために必要なバッチ間のバッファ時間の導出方法を提案する。そして、これらの手法の有効性をシミュレーションにより確認する。

2.1 緒言

近年、大型の素材型プラントは人件費や原燃料費の安い東南アジアや中国に生産拠点が移り、日本国内では付加価値の高い製品を製造する機能性化学プラントの重要度が増している。このような理由から多品種少量/変量生産に適しているバッチプロセスが注目されてきている。しかし、バッチプロセスは多品種少量生産に適しているものの、運転管理を精度良くかつ確実に実施しないと、生産効率が低下する可能性がある。またコスト競争力強化を目指した少人化が進むにつれて、従来の1人1缶監視操作体制から1人複数缶監視操作体制に移行してきている。それゆえ最小限の運転員でも精度良くかつ確実に運転を行うことが、プロセス業界において重要な課題となっている。

また、2007 年問題として話題になっているように、製造業全般において運転員の世代交代の時期にさしかかっており、熟練運転員が退職することによる製品品質の低下が懸念されている。熟練運転員はその日の製造環境からマスターレシピとのズレを五感で把握し、経験を駆使してその日のコントロールレシピに変換している。特に樹脂のコンパウンド、色材業界では職人技となっている。製品品質の作り込みが熟練運転員に委ねられている現状を改善することが必要であるが、製造に関わるすべての条件が必ずしもレシピに表現されていない現状を考えると、レシピで規定されている条件、手順で製造しているにもかかわらず目標品質を得るための所要時間が変動することは避けられない。

以上のような状況を考えると、レシピには不確定な情報が多く存在しているという前提でのアプローチをとることが現実的であると言える。一般的にマスターレシピからコントロールレシピへの変換メカニズムの解明度合いにより運転時の操作のばらつきの度合いが変わってくる。そこで本章では、コントロールレシピに変換された後に運転上現れてくる単位操作の所要時間の生産スケジュール作成時からの変動に着目する。そして、その変動に動的に対応することにより生産スケジュールに対する外乱を抑制する手法の提案と、そのような手法の利用を前提としたスケジュール作成法を提案する。

2.2 解決すべき課題

バッチプロセスにおいて、予め設定した操作開始時刻を維持できない要因として、原料や助剤品質のロット間の変動(中間製品を含む)、蒸気や水等の用役物性の変動があげられる。また、工場内における外気温や湿度等の製造環境の変動、装置の汚れや経年劣化等の装置特性の変動、さらに、原料誤投入(種類、量)やラインセットミス、操作ミス等のヒューマンエラーなども、予め設定した操作開始時刻を維持できない要因として考えられる。

これらの要因に基づく時間変動は、製品品質に対して致命的な影響を与えるケース、すなわちトラブルもあるが、日常的には各工程の所要時間に影響を与えるケースが多い。そして、この変動(主に所要時間の延び)により最初に立案された生産スケジュール通りに運転できなくなる。

バッチプラントでは連続プラントと比べて運転員のフィールド作業が多いのでヒューマンエラーが発生しやすい。緒言でも述べたように近年では、汎用製品を大量に生産する方式から顧客毎に固有の製品を生産する方式にシフトしてきており、従来に比べてきめ細かい銘柄変更や厳しい品質要求への対応が必要とされている。そして、立案された生産スケジュールに基づいて綿密な作業段取りを実施し、ミス無く効率良く製品品質を作り込む努力が行われている。また、省力化の観点から複数の系列を1人の運転員が管理することも多くなってきている。そのような状況では、1つのバッチの処理の遅れは、予め定めた作業手順の変更をもたらす可能性があり、当初の段取りに対して外乱を与え、ヒューマンエラーが発生しやすくなる。

各工程の所要時間がばらついていても、その変動が後続のバッチのスケジュールに影響を与えないようにするためには、バッチ間で十分な時間余裕(バッファ時間)をとればよい。しかしな

がらそのような運転法では、生産性が大きく低下してしまう。よって、工程の所要時間の変動を考慮しつつ、できるだけ効率の良いスケジュールを作成する必要がある。また、実際にプラントを運転している状況では、生じた変動が後続のバッチの運転にどのような影響を与えるか、また速やかに元のスケジュールに戻すためには、どのような操作をすべきかを運転員に提示するような支援システムが必要である。本章では、上述したような観点から第一ステップとして、変動を考慮したスケジュール作成法について提案する。このような手法の導入により、バッファ時間をシステムティックに設定することが可能となるとともに、あらかじめ選択した戦略に応じて運転途中での遅延時間を吸収させることを前提としたスケジュール作成を可能にする。

2.3 問題設定

2.3.1 対象プロセスのモデル

本章では説明を簡単にするため直列につながれた M 基のバッチ装置からなるバッチプロセスを対象とする。複数の系列からなる場合においても系列間のインターアクションがなければ、以下の結果はそのまま拡張可能である。対象とする製品の1バッチの生産に要する処理全体を1つのジョブと呼び、ジョブの各装置での処理順序は与えられていることを前提とする。

J 個のジョブを対象とし、各ジョブの装置間での追い抜きはないとする。ジョブ j の装置 m での処理は、 $S(j, m)$ 個の直列工程に分割される。第1工程は受入工程、第 $(S(j, m) - 1)$ 工程は次装置への移送工程、第 $S(j, m)$ 工程は洗浄工程とする。次装置への移送工程は、その次の装置の受入工程と同期する。そして、計画段階では、装置内での処理が終了した時点で直ちに次装置へ移送し、その間装置内で待機はしないものとする。

2.3.2 工程の処理時間

工程に要する時間を分類するためには、具体的に各工程においてどのような作業が行われているかを知る必要がある。

1) 移送操作

任意の装置から別の装置への原料、中間製品、製品を移動させる操作で、前の装置の流出工程と次の装置の流入工程が同期しなければならないという特長を有する。濾過移送の場合は、フィルタの目詰まりによりその処理時間はバッチを重ねる毎に延び、フィルタ洗浄またはフィルタ交換により元の処理時間に戻る。また、シーケンス制御による自動移送でない場合は、運転員による移送ラインのセットアップ作業が発生するため、人的要因による時間変動も考慮する必要がある。

2) バッチ装置内での昇降温操作

利用する媒体により昇降温時間が変化する。例えば、通常は温水で加熱操作するところを蒸気で加熱する、通常は再冷水で冷却操作するところを冷凍水で冷却する、というように一般にコストをかければ処理時間を短くできるという特長を有する。

3) 反応操作

終了条件が時間で与えられる場合と物質の状態与えられる場合がある。前者の場合であれば処理時間は変化しない。後者の場合はある程度ランダムに処理時間が変化する。処理終了をオフラインでの分析結果により判断する場合は分析時間も処理時間に含める。特急指定をすることで分析時間を短縮することが可能な場合もある。

4) 抽出操作 / 晶析操作

プロセス流体組成のバッチ間のばらつき、バッチ毎の製造環境のばらつきにより、処理時間が遅延する可能性が高い操作である。

5) 手作業での原料投入操作

前操作が終了後、指定された時間内に操作することが要求される場合が多い。この場合、「指定された時間」が処理時間になる。この処理時間は一般に余裕を持って設定される。よって、実際の原料投入操作にかかる時間はその指定された時間より短い場合が多く、的確な指示を与えることにより短縮可能な操作である。ただし、手動弁開閉ミス、原料の誤投入、処方設定ミス等様々なオペレーションミスや、操作タイミングおよび原料仕込量精度等の個人差が発生しやすいという特徴がある。

6) 洗浄操作

次バッチの製品種や前回の洗浄からの処理バッチ数により洗浄に要する時間が変わる場合がある。また、労力やコストをかけることにより、設定時間より短縮できる場合が多い。

以上のように、処理時間といっても操作により異なった特長を有する。本章では、各処理は以下の情報を有するものとし、かつ、レシピ情報とする。

標準処理時間（レシピ指定処理時間）

実績による平均処理時間

実績による処理時間の変動の標準偏差

処理時間短縮方法（本論文では以降、コントロール方式と称する）のタイプ

タイプ a：ジョブ間のバッファ時間のみで対応するバッファ時間利用コントロール

タイプ b：高価格のユーティリティ利用する用役対応コントロール

タイプ c：運転員の増員により対応する運転員対応コントロール

国際規格 ANSI/ISA-S88.01¹⁾においてレシピは、つぎの5種類の情報で構成されている。

- ・ Header : レシピコード、レシピ名、バージョン、作成日、作成者、特徴、改訂理由等の情報
- ・ Formula : 使用原料 / 助剤及び所要量、温度等の製造条件
- ・ Equipment Requirements : 使用設備及び設備要件
- ・ Recipe Procedure : 製造手順
- ・ Other Information : 製品規格、包装仕様、保管仕様、ラベル表示仕様等

上記の時間、コスト、人数および、
、
は Formula（以後、フォミュラと呼ぶ）に、
そして、上記の処理時間短縮方法タイプは Recipe Procedure（以後、処方プロシジャと呼ぶ）
に記載されているものとする。また、

- ・装置別に実施すべき単位操作
- ・装置間の移送 / 受入の関係
- ・工程の実施順序

に関する情報も処方プロシジャに記載されているものとする。

2.3.3 問題設定

実際の運転では、あらかじめ定めたスケジュール（以後、初期スケジュールと呼ぶ）通りに操作が進捗するとは限らない。ある工程の処理時間が基準値より延びた場合、そのバッチの処理時間変動が発生した工程以後の処理が初期スケジュールを守れないのは仕方がない。しかしながら、運転員の作業段取りに与える外乱、他の系列とのインターアクションもあることから、電車やバスの時刻表と同様にその変動が将来まで影響することは避けなければならない、できるだけ短期間で初期スケジュールに戻すことが望ましい。

このような観点から本章ではあらかじめ想定した大きさの変動が生じた際に、初期スケジュールに戻すために必要なバッチ数を変動に対する対応能力の評価とし、以下の問題を設定する。

< 問題設定 >

処理順の定まった N 個のジョブを考える。これらのジョブのいずれかの工程の処理時間が、その変動の標準偏差の K 倍の時間延びたとき、その変動がどの装置のどの工程であろうとも、あらかじめ定めたバッチ数（ H バッチとする）以内で初期スケジュールに戻せるスケジュール（許容スケジュールと呼ぶ）のなかで、最終ジョブの終了時刻の最も早いスケジュール（最適許容スケジュールと呼ぶ）を作成する手法を求めよ。

2.4 処理時刻の導出

2.4.1 初期スケジュール作成

現実のプロセスでは、処理終了後装置内に製品を保持することは、エネルギー消費や品質上好ましくないケースが多々ある。よって本章では、やむをえない場合を除いて極力装置内に物質を保持しないことを前提としたスケジュール立案を行うこととした。

ここで、各工程を標準処理時間で処理すると仮定し、かつ、各ジョブは各装置の工程間で待ち時間をとらずに運転するスケジュールを考える。このようなスケジュールの中で、連続して処理される2つのジョブに対して、いずれかの装置で待ち時間をとらずに2つのジョブが実施されるスケジュールを最早スケジュールと呼ぶ。ジョブの実施順が決定されれば、最早スケジュールでの各ジョブの各装置での開始時刻は、以下に示したアルゴリズムで求めることができる。

< 最早スケジュール作成アルゴリズム >

スケジュールを作成すべきジョブをジョブ1からジョブ J とし、この番号の順に実施されるとする。また、各ジョブは、 M 基の装置を装置1から M の順に利用する。ジョブが割り当てられていない状態での装置 m の利用開始可能時刻を $E_{0,m}$ とする。各ジョブを工程間で待ち時間無しで処理する場合、各ジョブの各装置での処理開始時刻、処理終了時刻は以下のようにして求められる。

まず、各ジョブ(ジョブ j)の装置1での最初の工程を時刻0で始めた際の各装置(装置 m)での開始時刻 $T_{j,m}$ を次式で計算する。

$$T_{j,1} = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (2.1)$$

$$T_{j,m} = T_{j,m-1} + \sum_{s=1}^{S(j,m-1)-2} P_{j,m-1,s} \quad (m = 2, 3, \dots, M; j = 1, 2, \dots, J) \quad (2.2)$$

ここで、 $P_{j,m,s}$ は、ジョブ j の装置 m における第 s 工程の標準処理時間である。

Eqs. (2.1)、(2.2)を用いることにより、最早スケジュールでの各ジョブ j の各装置 m での開始時刻 $t_{j,m}^*$ および終了時刻 $e_{j,m}^*$ は、次式群を $j = 1$ から順に計算することで求められる。

$$e_{0,m}^* = E_{0,m} \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (2.3)$$

$$D_j = \max_m \{e_{j-1,m}^* - T_{j,m}\} \quad (2.4)$$

$$t_{j,m}^* = T_{j,m} + D_j \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (2.5)$$

$$e_{j,m}^* = t_{j,m}^* + \sum_{s=1}^{S(j,m)} P_{j,m,s} \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (2.6)$$

ここで、 D_j は前のジョブと処理が重ならないための、ジョブ j の装置1での最早開始時刻である。 $m=5$ の場合を例にとり、上記の最早開始時刻決定アルゴリズムのイメージをFigure 2.1に示す。Figure 2.1 上図は、ジョブ $j-1$ のスケジュールは確定しており、ジョブ j の開始時刻を求める段階を示す。Eq. (2.4)で得られる D_j は $T_{j,1} = 0$ の位置にあるジョブ j をどれだけ移動させたらジョブ $j-1$ の直後に配置できるかを示す時間である。この例では、装置3での $\{e_{j-1,m}^* - T_{j,m}\}$ の値が最大であり、Figure 2.1 下図のように装置3でジョブ間の待ち時間が0になるスケジュールとなっている。

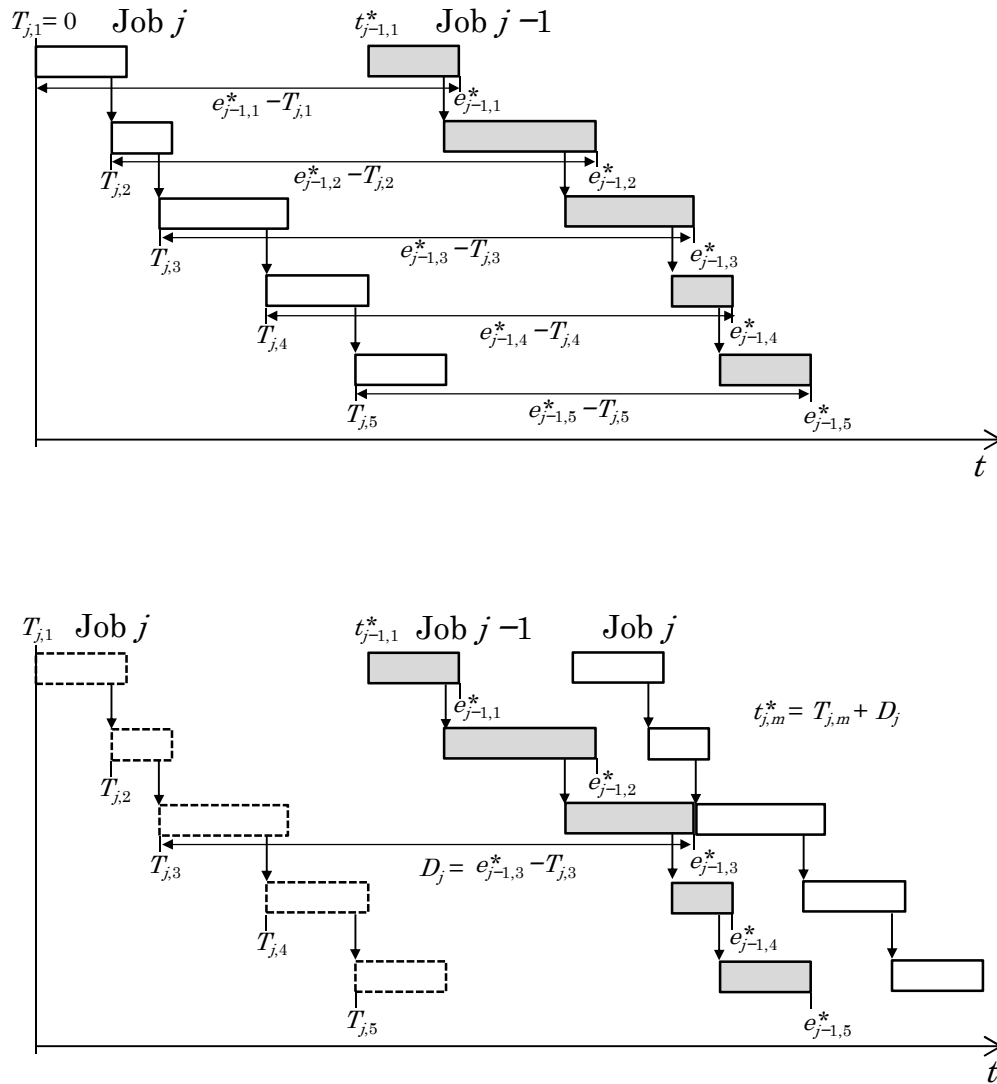


Fig.2.1 Job assignment algorithm

2.4.2 バッファ時間を使った最適許容スケジュールの導出

ある装置のあるバッチにて処理時間に遅延が生じた後、各バッチを初期スケジュール通りに開始した場合、いずれかの装置で初期スケジュール通りに操作できなくなる(一般に、ある装置から次の装置へ移送しようとした際に、移送先の装置が前のバッチの処理を実行している状態になる)。このような場合、移送を遅らせることになるが、移送操作を遅らせれば、次のバッチの流入操作に影響を与える可能性がある。変動の伝播を止める一つの方法は、運転スケジュールを作成する際、バッチ間に変動を吸収するバッファ時間を持たせることである。前節に示した初期スケジュール計算法は、ジョブ間で待ち時間を取らずに運転される装置(ボトルネック装置)において、全く余裕のないスケジュールを導出する。よって、Eq. (2.4)を以下のように変更し、各ジョブの開始時刻と終了時刻を求めれば、ジョブ $j-1$ とジョブ j の間でボトルネック装置において b_{j-1} だけ余裕を持ったスケジュールとなる。

$$D_j = \max_m \{e_{j-1,m}^* - T_{j,m}\} + b_{j-1} \quad (2.7)$$

Eq. (2.7)のようにバッチ間に余裕を与えることにより、変動の影響を H バッチ目までに吸収できるスケジュールが許容スケジュールであり、許容スケジュールの中で最終ジョブ終了時刻の最も早いスケジュールが最適許容スケジュールである。

バッチ間にバッファ時間を挿入する方法は生産現場において広く用いられているが、バッファ時間 b_j の値は経験や運転シフト体制、例えば、三交替であれば8時間サイクルにするといった観点から定められているのが現状である。

Orçun ら²⁾は、発酵プロセスを対象に運転員の作業時間、単位操作時間、生産量を不確定要素としてとらえ、そのばらつきを確率分布で表現し、リスクレベルという評価関数にて最適化スケジュールを作成する方法を提案している。しかしながら、最終的に指定された納期、生産量を満足することを目的としており、その過程でのスケジュールの乱れは考慮されていない。すなわち、遅延が発生した場合に元のスケジュールにもどすような進捗コントロールまでは実施しないということである。本章ではOrçun ら²⁾の研究を発展させて、遅延が発生した場合に、指定した戦略に基づいて元のスケジュールに戻すようなコントロールの適用を考慮したバッチ間バッファ時間のシステマティック、かつ、簡易的な決定法を提案する。

2.4.3 バッファ時間が満たすべき制約

バッファ時間が満たすべき条件を求めるため、まず初期スケジュールが最早スケジュールとして計画された条件下で、ジョブ L の装置 R のある工程の操作が時間 d だけ遅れた場合を考える。この時、ジョブ $L + H$ での終了時刻の遅れは、以下の考え方により求めることができる。

遅れが生じた際のジョブ L の各装置 m での終了時刻 $e_{L,m}^+$ は、遅れが洗浄工程か否かで、以下のように求められる。

遅れが洗浄工程以外の時

$$e_{L,m}^+ = e_{L,m}^* \quad (m = 1, 2, \dots, R-1) \quad (2.8)$$

$$e_{L,m}^+ = e_{L,m}^* + d \quad (m = R, R+1, \dots, M) \quad (2.9)$$

ここで、 $e_{j,m}^*$ は、Eq. (2.6)で求められる、各ジョブの各装置での最早終了時刻である。

遅れが洗浄工程の時、遅れが生じてもそのジョブの装置 $R + 1$ 以降の操作には影響しない。よって、

$$e_{L,m}^+ = e_{L,m}^* \quad (m = 1, 2, \dots, M; m \neq R) \quad (2.10)$$

$$e_{L,R}^+ = e_{L,R}^* + d \quad (2.11)$$

上式群で得られたジョブ L の各装置での終了時刻をもとに、ジョブ $L + 1$ からジョブ $L + H$ までのジョブ j の各装置(装置 m) での開始時刻 $t_{j,m}^+$ 、終了時刻 $e_{j,m}^+$ は、以下の式で j を $L + 1$ から $L + H$ まで変化させることにより計算できる。

$$t_{j,1}^+ = \max\{e_{j-1,1}^+, t_{j,1}^*\} \quad (2.12)$$

$$t_{j,m}^+ = \max\{e_{j-1,m}^+, t_{j,m-1}^+ + \sum_{s=1}^{S(j,m-1)-2} P_{j,m-1,s}\} \quad (m = 2, 3, \dots, M) \quad (2.13)$$

$$e_{j,m-1}^+ = t_{j,m}^+ + P_{j,m-1,S(j,m-1)-1} + P_{j,m-1,S(j,m-1)} \quad (m = 2, 3, \dots, M) \quad (2.14)$$

$$e_{j,M}^+ = t_{j,M}^+ + \sum_{s=1}^{S(j,M)} P_{j,M,s} \quad (2.15)$$

ここでは、ある装置での処理が終了したとき、次装置が使用中であれば次装置が利用可能になるまで装置中で保持できると仮定して、開始時刻と終了時刻を求めている。すなわち、各装置上でのジョブの終了時刻 $e_{j,m}^+$ は、その装置での開始時刻にその装置で行う全ての処理の処理時間を加えた値でなく、Eq. (2.14) に示すように次の装置での開始時刻と関係づけて求める必要がある。上記の結果を用いることにより、ジョブ $L + H$ の最早スケジュールからの遅れ d_L は以下のようにして求められる。

$$d_L = t_{L+H,M}^+ - t_{L+H,M}^* \quad (2.16)$$

Figure 2.2 に遅延発生後におけるジョブ j の装置 m での開始時刻決定イメージを示す。
Figure 2.2 上図は、ジョブ j の装置 m での開始時刻が同一装置の前のジョブの終了時刻により規定されるケース、すなわち $t_{j,m}^+ = e_{j-1,m}^+$ となるケースである。

また、Figure 2.2 下図は、ジョブ j の装置 m での開始時刻が同一ジョブの前の装置での流出時刻により規定されるケース、すなわち、 $t_{j,m}^+ = t_{j,m-1}^+ + \sum_{s=1}^{S(j,m-1)-2} P_{j,m-1,s}$ となるケースである。

これら双方を表した関係式が Eq. (2.13) である。Eq. (2.14) に示すように各装置でのジョブの終了時刻は、同一ジョブの次の装置での開始時刻から定まる。このようになることは Figure 2.2 上図を見れば理解できる。

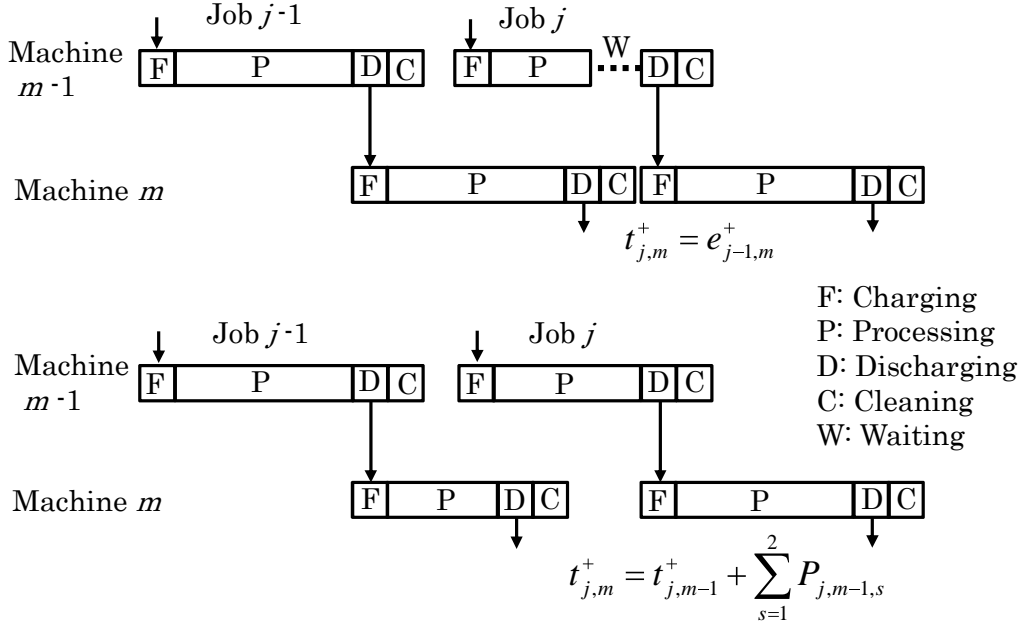


Figure 2.2 Job assignment after delay

ジョブ L の各装置における洗浄工程以外の工程での最大遅れ、および洗浄工程での遅れに対してジョブ $L + H$ の最早スケジュールからの遅れを計算し、その中で最大のものを d_L^* とする。このようにおけば、ジョブ L に変動が生じてジョブ $L + H$ を遅らせずに運転できる条件は、ジョブ L からジョブ $L + H$ の間に d_L^* 以上の余裕を持たせることである。

ジョブ j とジョブ $j + 1$ の間に設定する余裕時間(以後、バッファ時間と呼ぶ)を b_j とすれば、ジョブ 1 からジョブ $J - H$ の間のあるジョブのある装置のある工程で変動が生じたとき、 H バッチ後のジョブに影響を与えない条件は以下ようになる。

$$b_j + b_{j+1} + \dots + b_{j+H-1} \geq d_j^* \quad (j = 1, 2, \dots, J - H) \quad (2.17)$$

$$b_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J - 1) \quad (2.18)$$

Eqs. (2.17)、(2.18)を満たす $J - 1$ 個の変数 b_j が存在することは明らかである。よって、上式を満たす中で、ジョブ J の終了時刻を最も早くするような b_j は、上式を制約として、

$$B = b_1 + b_2 + \dots + b_{J-1} \quad (2.19)$$

を最小にする線形計画問題を解けば求められる。実応用では、様々な仮定のもとに導出された d_L^* に対して、多くの計算時間を費やして厳密な最適解を出すことは、日常のスケジュール作

成業務には適さない。また、下記の例からわかるように、Eq. (2.17)を等式として満たす b_j が必ずしも存在するとは限らない。たとえば、 $H = 2$ とした場合、 $b_1 + b_2 = 1$ 、 $b_2 + b_3 = 10$ 、

$b_3 + b_4 = 1$ を満たす非負の b_1, b_2, b_3, b_4 は存在しない。そこで、以下では簡単な計算で実行可能解を求めるアルゴリズムを提案する。Figure 2.3 に示すように Eq. (2.17) では、変数 b_j の数は $J - 1$ 、式の数 $J - H$ であり、変数の数が式の数より $H - 1$ 多い。よって、以下のようにして実行可能解を求めることができる。

ジョブ1における最大遅れ d_1^* を吸収するためには、

$$b_1 + b_2 + \dots + b_H = d_1^* \quad (2.20)$$

を満たせばよい。そこで、 b_1, b_2, \dots, b_H を、

$$b_1 = b_2 = \dots = b_H = d_1^* / H \quad (2.21)$$

と定める。

つぎに、ジョブ2以降の各ジョブの最大遅れを吸収するための Eq. (2.17) を満たす可能解 b_j は、Eq. (2.21) の結果を利用することにより、

$$b_{j+H-1} = \max\{0, d_j^* - b_j - b_{j+1} - \dots - b_{j+H-2}\} \quad (j = 2, 3, \dots, J - H) \quad (2.22)$$

で求めることができる。

上記の簡易解法では負値を0に設定している。そのため、最適スケジュールとは限らないが、安全側の解となっている。

このように b_1, b_2, \dots, b_{J-1} を定めれば、ジョブ1からジョブ $J - H$ のいずれのジョブで変動が生じてでも H バッチ以内に初期スケジュールに戻すことが可能である。

2.5 コントロールを考慮したスケジュール方法

2.5.1 コントロールを考慮したバッファ時間算出法

2.3 節で述べたように、現実のスケジュールでは各工程の所要時間は余裕を持って設定されている場合がある。変動が生じた際、これらの余裕を使うことをあらかじめ考慮してスケジュールを作成することも可能である。ここでは、変動吸収に利用する工程所要時間短縮法をあらかじめ与えることにより、ジョブ j の装置 m での工程 q の所要時間を $\Delta P_{j,m,q}$ だけ短縮できると

する。このような条件下では、ジョブ間を取るべき余裕を以下のように求めることができる。

バッファ時間が満たすべき条件を求めるため、まず初期スケジュールが最早スケジュールとして計画された条件下で、ジョブ L の装置 R のある工程の操作が時間 d だけ遅れた場合を考える。この時、ジョブ $L + H$ での終了時刻の遅れは、以下の式により求めることができる。

ジョブ L の各装置での終了時刻は、遅れが洗浄工程か否かで Eqs. (2.8)、(2.9) あるいは、Eqs. (2.10)、(2.11) にて求められる。 j を $L + 1$ から $L + H$ まで変化させて開始時刻を求める。

$$t_{j,1}^+ = \max\{e_{j-1,1}^+, t_{j,1}^*\} \quad (2.23)$$

$$t_{j,m}^+ = \max\{e_{j-1,m}^+, t_{j,m-1}^+ + \sum_{s=1}^{S(j,m-1)-2} (P_{j,m-1,s} - \Delta P_{j,m-1,s})\} \quad (m = 2, 3, \dots, M) \quad (2.24)$$

$$e_{j,m}^+ = t_{j,m+1}^+ + (P_{j,m,S(j,m)-1} - \Delta P_{j,m,S(j,m)-1}) + (P_{j,m,S(j,m)} - \Delta P_{j,m,S(j,m)}) \quad (m = 1, 2, \dots, M-1) \quad (2.25)$$

$$e_{j,M}^+ = t_{j,M}^+ + \sum_{s=1}^{S(j,M)} (P_{j,M,s} - \Delta P_{j,M,s}) \quad (2.26)$$

上記の結果を用いることにより、ジョブ $L + H$ の最早スケジュールからの遅れ d_L は以下のようにして求められる。

$$d_L = \max_m \{0, (t_{L+H,m}^+ - t_{L+H,m}^*)\} \quad (2.27)$$

ジョブ L の各装置における洗浄工程以外の工程での最大遅れ、および洗浄工程での遅れに対してジョブ $L + H$ の最早スケジュールからの遅れを計算し、その中で最大のものを d_L^* とする。

以下、2.4.3 項と同様にして、各ジョブ間に持つべきバッファ時間 b_j を求めることができる。

なお本節では、ジョブ L の装置 R の操作が遅れた場合、運転員への配慮から、そのジョブの装置 $R + 1$ 以降については、処理時間の短縮は行わないとしてジョブ $L + H$ の操作の遅れを求めた。ただし、ジョブ L の装置 R の操作が遅れた場合に、そのジョブの装置 $R + 1$ 以降について処理時間を短縮できると仮定した場合についても、ジョブ L の各装置での終了時刻を求める計算 (Eq. (2.9) あるいは Eq. (2.11)) を少し変形することにより、Eqs. (2.23) - (2.27) を用いてジョブ $L + H$ の操作の遅れを求めることができる。

2.5.2 コントロール戦略

2.3 節において、現場作業の効率化、高価格用役の利用、運転員の増員といった工程所要時間短縮方法、すなわちコントロール方式を示したが、どのようなコントロール方式を採用するかは、スケジュールを作成する段階で、対象期間における製品の在庫および受注状況により柔軟に決定する必要がある。

たとえば、用いるコントロール方式の違いにより、以下の様な生産戦略を考えることができる。いずれの場合も正常復帰バッチ数 H を指定する。

(1) 生産機会重視戦略

変動発生後 ($H - 1$) バッチの間、各装置の各工程で適用可能なコントロールをすべて実施するという前提でバッファ時間 b_j を決定する。このように設定することで、与えられた範囲の変動に対し H バッチでの正常スケジュールへの復帰を保証したスケジュールの中で、最終ジョブの完了時刻は最早となる。

(2) コスト重視戦略

変動発生後 ($H - 1$) バッチの間、各装置の各工程で用役費や労務費を増加させることのない

所要時間短縮法のみ実施するという前提で b_j を決定する。

(3) ヒューマンエラー防止重視戦略

変動発生後 ($H - 1$) バッチの間、各装置の各工程で運転員の負担強化にならない所要時間短縮法（たとえば、高価格用役の利用など）のみ実施するという前提で b_j を決定する。

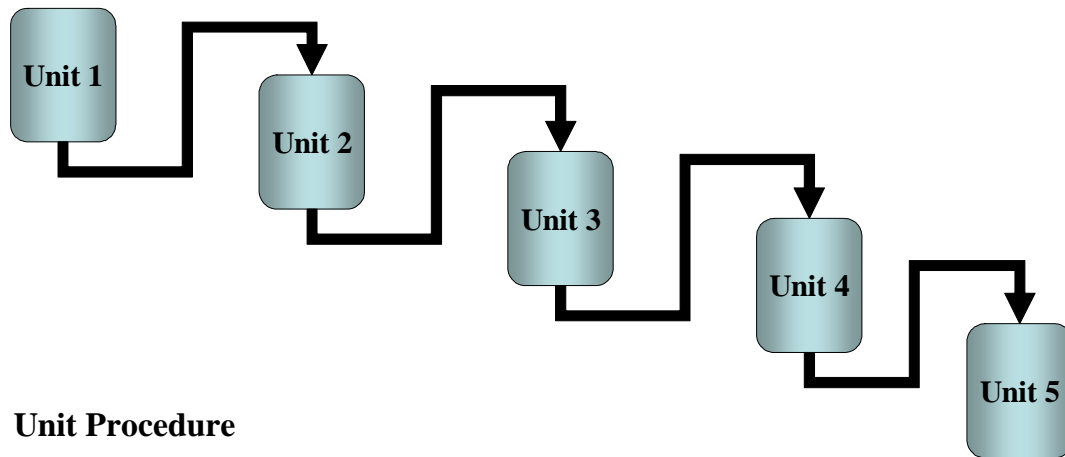
2.6 シミュレーションによる検証

2.6.1 対象プロセス

本研究で提案したバッチ間バッファ時間決定手法の有効性をシミュレーションにて検証した。検証対象プロセスを Figure 2.3 に示す。Unit 1 - 5 の 5 基のバッチ装置から構成され、番号順に使用される。すべての製品の各装置での操作は、受入 (Charging)、処理 (Processing)、移送 (Discharging)、洗浄 (Cleaning) の 4 工程からなるものとし、前の装置の移送工程は次の装置の受入工程と同期を取る必要がある。

スケジュール対象の製品は A、B、C の 3 種類であり、そのレシピを Table 2.1 に示す。ここで、各装置の各工程で考慮すべき最大遅れ時間を Delay Time 欄に示す。この値は、実プロセスでは各工程の標準処理時間 (Operation Time)、実績による平均処理時間、実績による処理時間の変動の標準偏差、変動後標準スケジュールに戻すまでのバッチ数の設定値等を考慮して定められる。

Procedure



Unit Procedure

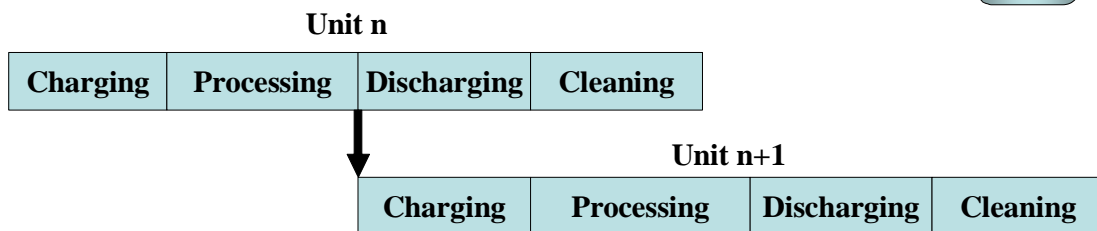


Fig.2.3 Target process

Table 2.1 Target recipe

Time : [min]

Unit No	Operation Type	Product A				Product B				Product C			
		Operation Time	Max Delay Time	Controllable Time		Operation Time	Max Delay Time	Controllable Time		Operation Time	Max Delay Time	Controllable Time	
				Work Change	UTT Change			Work Change	UTT Change			Work Change	UTT Change
1	Charging	20	0	0	0	20	0	0	0	20	0	0	0
	Processing	150	69	2	3	120	69	2	5	160	51	22	10
	Discharging	20	0	0	0	20	0	0	0	20	0	0	0
	Cleaning	30	0	0	5	30	0	0	5	20	0	0	0
2	Charging	20	0	0	0	20	0	0	0	20	0	0	0
	Processing	160	99	5	3	190	90	4	5	160	33	12	20
	Discharging	20	0	0	0	20	0	0	0	20	0	0	0
	Cleaning	30	0	0	5	40	0	0	15	20	0	0	0
3	Charging	20	0	0	0	20	0	0	0	20	0	0	0
	Processing	170	102	2	5	180	111	5	5	160	27	7	15
	Discharging	20	0	0	0	20	0	0	0	20	0	0	0
	Cleaning	80	0	0	15	40	0	0	10	20	0	0	0
4	Charging	20	0	0	0	20	0	0	0	20	0	0	0
	Processing	170	96	4	3	190	90	15	15	140	33	10	15
	Discharging	20	0	0	0	20	0	0	0	20	0	0	0
	Cleaning	30	0	0	5	30	0	0	5	40	0	0	10
5	Charging	20	0	0	0	20	0	0	0	20	0	0	0
	Processing	90	27	2	0	150	108	10	15	160	27	10	20
	Discharging	20	0	0	0	20	0	0	0	20	0	0	0
	Cleaning	60	0	0	10	40	0	0	5	20	0	0	0

本例では、運転実績が蓄積されており、対象製品の対象工程における処理時間の標準偏差が与えられているという前提で、平均処理時間からのばらつきの99%の変動を考慮することとし、処理時間の変動の標準偏差の3倍の時間を考慮すべき最大遅れ時間とした。また、各工程の処理時間の変動の標準偏差は、経験に基づき設定した。

また、コントロール可能時間を Controllable Time 欄に示す。本例題では、運転員の作業形態変更(Work Change)および用役変更(UTT Change)の2種類のコントロール方法が選択可能とした。プロセスは時刻0において全ての装置が利用可能であり、各バッチの開始および終了時刻は通算分で表す。

2.6.2 シミュレーション結果

戦略の違いは、レシピにおけるどの Controllable Time を選択するかということである。すなわち、生産機会重視は Work Change と UTT Change の両者を、コスト重視は Work Change のみを、そしてヒューマンエラー防止重視は UTT Change のみを選択する。したがって、生産機会重視で有効性が示せれば、他の戦略でも有効であると言える。そこで、対象プロセスにおいて、コントロール戦略として生産機会重視を採用した場合の初期スケジュールおよび遅延発生時のスケジュールのシミュレーション結果を以下に示す。

a) 初期スケジュール

< Case A >

製品Bを3バッチ、製品Aを2バッチ製造する生産計画(Case Aと呼ぶ)における以下に記す3種類の初期スケジュールをFigure 2.4に示す.

ハッチング無し: 最早スケジュール(Earliest)

点ハッチング: 工程の所要時間短縮法を用いない最適許容スケジュール(Buffered)

$H = 3$ バッチ

格子ハッチング: 生産機会重視戦略を適用した最適許容スケジュール(Controlled)

$H = 3$ バッチ

< Case B >

製品Cを1バッチ、製品Aを1バッチ、製品Bを3バッチ製造する生産計画(Case Bと呼ぶ)における以下の3種類の初期スケジュールをFigure 2.5に示す.

ハッチング無し: 最早スケジュール(Earliest)

点ハッチング: 工程の所要時間短縮法を用いない最適許容スケジュール(Buffered)

$H = 3$ バッチ

格子ハッチング: 生産機会重視戦略を適用した最適許容スケジュール(Controlled)

$H = 3$ バッチ

各図中にはスケジュールを示すガントチャートに加え、 d_L^* の値とEqs. (2.20)-(2.22)で計算された b_j の値、そして、最終ジョブ(5バッチ目)における最早スケジュール、最適許容スケジュールおよび生産機会重視戦略を適用した際の最適許容スケジュールそれぞれのケースのUnit 1の開始時間とUnit 5の終了時間を示す.

Case Aでは、所要時間短縮法を用いない場合の1バッチ目、2バッチ目で想定される最大遅れがそれぞれ101分、111分、それから、1バッチ目から5バッチ目までのバッファ時間は34分、34分、34分、43分、生産機会重視戦略を適用した場合の1バッチ目、2バッチ目で想定される最大遅れがそれぞれ51分、74分、1バッチ目から5バッチ目までのバッファ時間は17分、17分、17分、40分である. 工程の所要時間短縮を考えない場合に比べ生産機会重視戦略をとることにより、 d_L^* の値は小さくなっている. そして、それに伴い b_j の値も小さくなっている.

またこのとき、Unit 1の開始時間とUnit 5の終了時間はそれぞれ

最早スケジュール : 1100分、2000分

所要時間短縮法を用いない場合 : 1245分、2145分

生産機会重視戦略を適用した場合 : 1191分、2091分

となり、最早スケジュールに比べて最終ジョブの終了時間は、所要時間短縮法を用いない場合の最適許容スケジュールの場合だと145分遅くなるが、生産機会重視戦略をとることにより遅れが91分に抑えられて54分短縮されることになる.

同様に Case B では、所要時間短縮法を用いない場合の1バッチ目、2バッチ目で想定され

る最大遅れがそれぞれ51分、102分、それから、1バッチ目から5バッチ目までのバッファ時間は17分、17分、17分、68分、生産機会重視戦略を適用した場合の1バッチ目、2バッチ目で想定される最大遅れがそれぞれ21分、63分、1バッチ目から5バッチ目までの余裕時間は7分、7分、7分、49分である。工程の所要時間短縮を考えない場合に比べ生産機会重視戦略をとることにより、 d_L の値は小さくなっている。そして、それに伴い b_j の値も小さくなっている。

またこのとき、Unit 1の開始時間とUnit 5の終了時間はそれぞれ

最早スケジュール : 1050分、2040分

所要時間短縮法を用いない場合 : 1169分、2159分

生産機会重視戦略を適用した場合 : 1120分、2110分

となり、最早スケジュールに比べて最終ジョブの終了時間は、所要時間短縮法を用いない場合の最適許容スケジュールの場合だと119分遅くなるが、生産機会重視戦略をとることにより遅れが70分に抑えられて49分短縮されることになる。

b) 遅延発生時のスケジュール

Case Aにおいて、1バッチ目のUnit 3で最大の遅延(Processingでの111分の遅れ)が発生した場合の各スケジュールの変化をFigure 2.6に、また、Case Bにおいて、1バッチ目のUnit 2で最大の遅延(Processingでの33分の遅れ)が発生した場合の各スケジュールの変化をFigure 2.7に示す。図中上段は最早スケジュール(Earliest)、中段は工程の所要時間短縮法を用いない最適許容スケジュール(Buffered)、下段は生産機会重視戦略を適用した最適許容スケジュール(Controlled)である。そして、装置毎に初期スケジュール(塗潰し無し)と遅延発生時のスケジュール(塗潰し)を対比している。また、ハッチング箇所は遅延発生ユニットを表している。

いずれのケースも、最早スケジュールの場合は、初期スケジュールと遅延発生時スケジュールの4バッチ目の各装置の終了時間にずれが発生しており、遅延を回復することができない。しかし最適許容スケジュールの場合は、あらかじめバッファ時間を設定しているために、Case Aでは2バッチ目と3バッチおよび3バッチ目と4バッチ目の間のバッファ時間に、Case Bでは2バッチ目と3バッチ目の間のバッファ時間に遅延時間が吸収されて4バッチ目(指定されたバッチ)の開始時刻は所定のスケジュールに復帰できている。

また生産機会重視戦略を適用した際の最適許容スケジュールの場合は、Case AではUnit 2における3バッチ目、Unit 3、Unit 4およびUnit 5における2バッチ目と3バッチ目の処理時間が調節され、同一製品の2バッチ目(Product B)の処理時間が調節された例であり、Case Bでは、Unit 1およびUnit 2における3バッチ目、Unit 3、Unit 4およびUnit 5における2バッチ目と3バッチ目の処理時間が調節され、異なる製品の2バッチ(Product AとB)の処理時間が調節された例である。

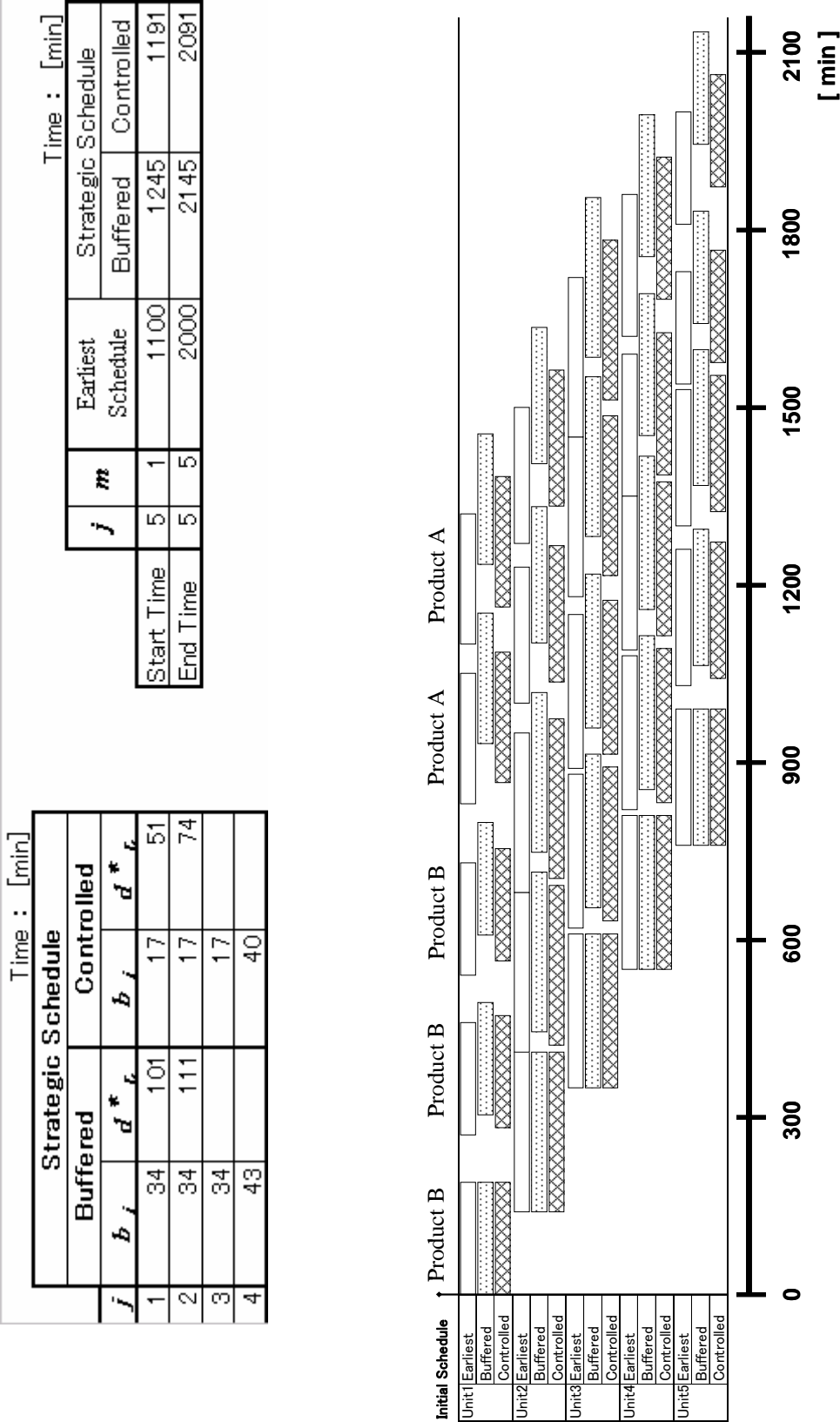


Fig. 2.5 Initial schedule (Case A)

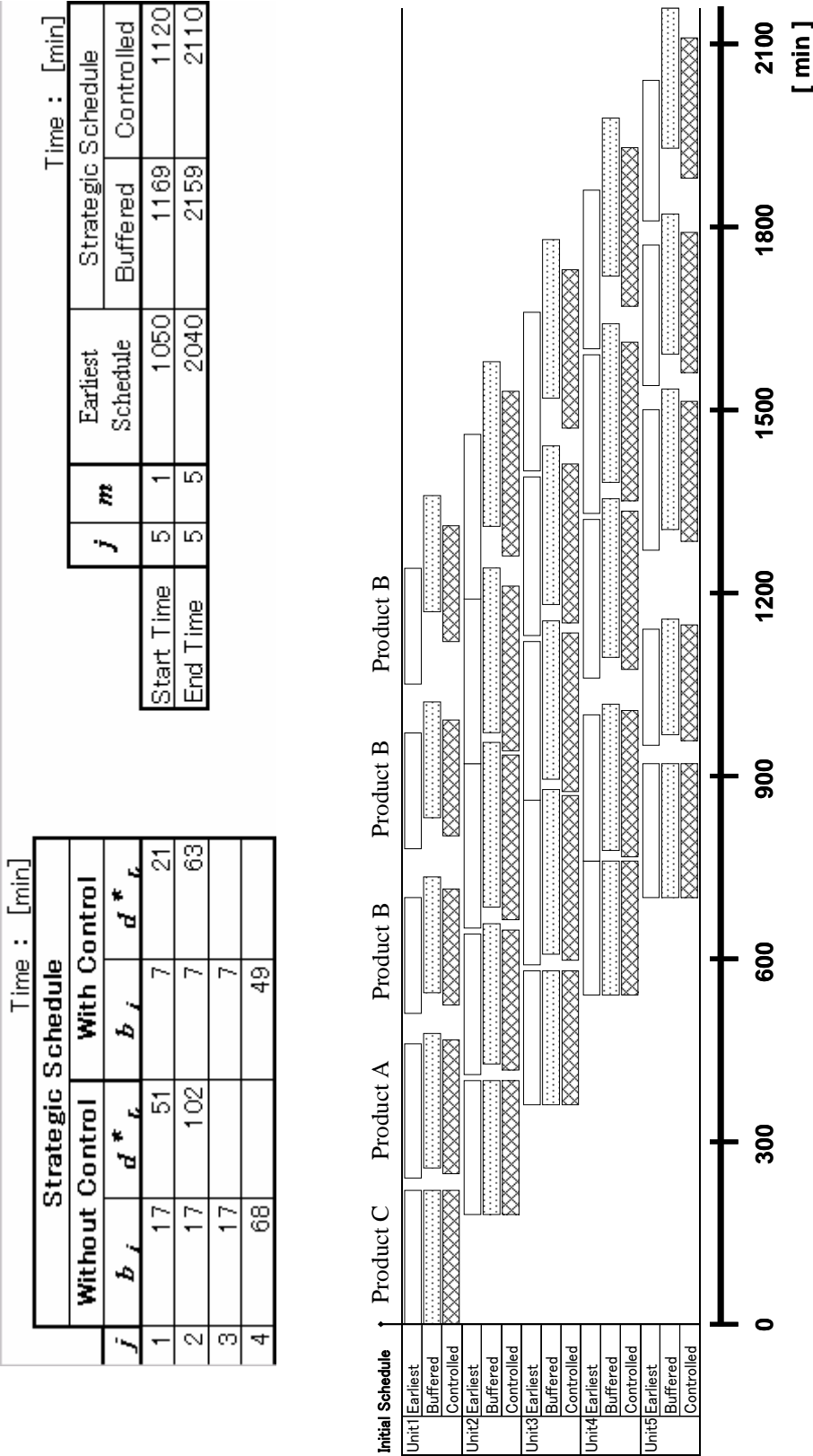


Fig. 2.6 Initial Schedule (Case B)

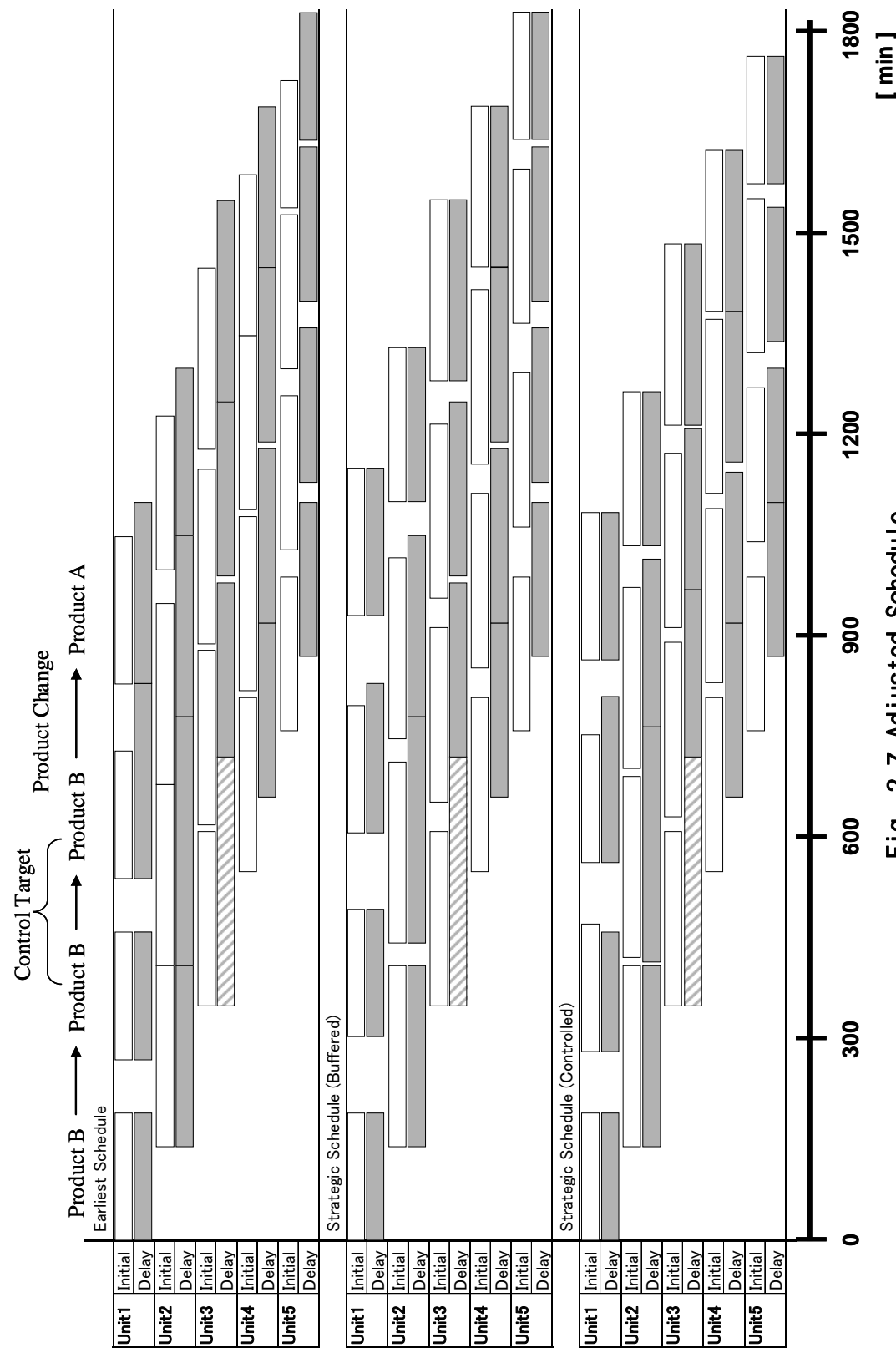


Fig. 2.7 Adjusted Schedule
(Case A: Delay occurred at first batch of unit 3)

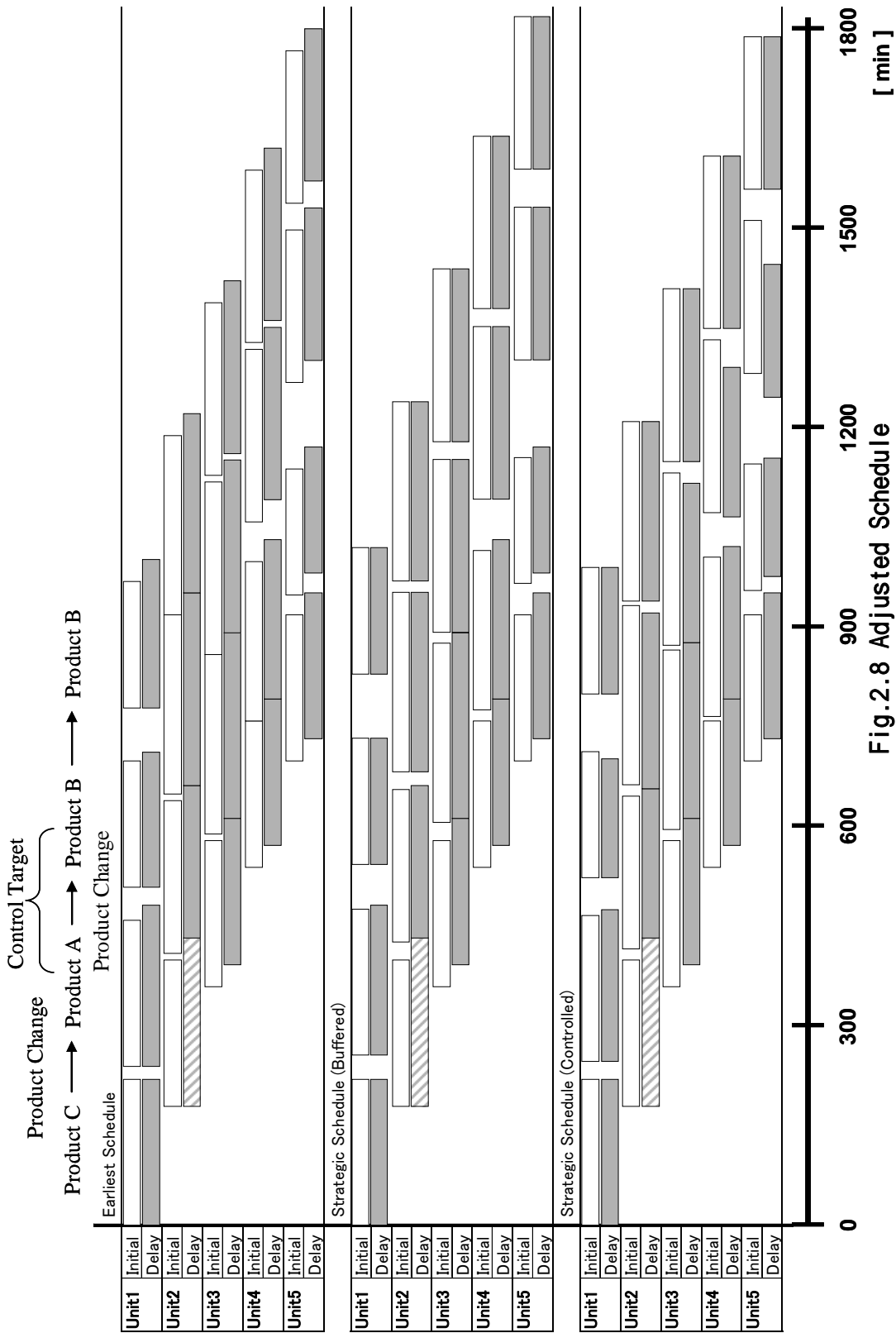


Fig.2.8 Adjusted Schedule
(Case B: Delay occurred at first batch of unit2)

バッファ時間を設定することにより、遅延が生じない場合には最早スケジュールよりも最終ジョブの完了時刻は遅くなる。しかしながら各工程の処理時間の余裕を積極的に活用することにより、遅延に対してあらかじめ設定したバッチ数以内で、元のスケジュールに戻せることを保証しつつ最終ジョブの完了時刻を最早スケジュールの完了時刻に近づけることが可能である。

以上、二つの例題により、従来、経験で設定されていたジョブ間のバッファ時間を、戦略に応じてシステムティックに決定でき、かつ、遅延が発生しても指定されたバッチ数で基本スケジュールからのズレが調整され外乱が抑制されることがわかり、提案した手法の有効性が確認できた。

2.7 結 言

スケジュールが与えられた時、ある装置の処理の遅れがその時刻以降のスケジュールに与える影響を検討した。そして、あらかじめ想定した範囲の遅れに対して、あらかじめ指定したバッチ数以内でその遅れを吸収できるようなバッチ間のバッファ時間の定め方を提案した。さらに、生産機会重視、ヒューマンエラー防止重視、用役コスト重視などの様々な戦略により、特定の処理時間が短縮可能という条件下で処理時間の変動を吸収するために必要なバッチ間のバッファ時間の導出方法を提案した。

本章で提案した新しいバッファ時間決定法は、確実／安全に製品を市場に供給する上で有効な手段の一つであると考えている。バッチプロセスはベテラン運転員の勘と経験に基づいた固有技術により成り立っているものが多く、生産管理面でも同様に進捗コントロールを考慮したシステムティックなスケジュール立案法は今まで検討されていなかった。しかし、今回提案した手法を用いることにより、受注状況に応じて柔軟性のある戦略に基づいてシステムティックにバッチ間のバッファ時間を決定できる。この方法により、運転進捗変動の影響を受けにくいロバスト性のあるスケジュールを容易に立案することが可能となる。

本章では進捗実績を取り込まないオフラインでのスケジュール作成を対象とした。次のステップとして運転の進捗に合わせてリアルタイムに、コントロールすべきユニット、工程、およびその目標所要時間のガイダンスを提供する手法を検討する必要がある。この手法が確立できれば、単位操作の時間が遅延することによる影響が抑えられ、運転員の手作業や関連部署の業務が安定化するとともに、生産性や品質が安定化し、競争力が強化されと考えられる。さらに進捗変動要因の排除という観点から、情報の不確定さを削減するように

- ・製品品質を作り込むメカニズムの解明
- ・製造条件におけるレシピからのズレが与える単位操作時間の影響の明確化
- ・コントロールポイントの明確化

という点も重要な研究課題である。

Nomenclature

b_j	= buffer time between job j and job $j+1$ at bottleneck unit	[-]
d	= delay	
d_L	= delay of job $L+H$ when the disturbance occurs at job L	[-]
d_L^*	= maximum delay of job $L+H$ when the disturbance occurs at job L	[-]
D_j	= earliest start time at the first unit for job j	[-]
$e_{j,m}^*$	= earliest completion time at unit m for job j	[-]
$e_{j,m}^+$	= optimal completion time at unit m for job j under disturbance	[-]
$E_{0,m}$	= earliest available time at unit m	[-]
H	= number of batches in which the disturbance is absorbed	[-]
J	= number of jobs	[-]
M	= number of batch units	[-]
$P_{j,m,q}$	= processing time of stage q at unit m for job j	[-]
$S(j, m)$	= number of stages at unit m for job j	[-]
$t_{j,m}^*$	= earliest start time at unit m for job j	[-]
$t_{j,m}^+$	= optimal start time at unit m for job j under disturbance	[-]
$T_{j,m}$	= earliest start time at unit m for job j when the job starts at time 0	[-]
$\Delta P_{j,m,q}$	= adjustable time of stage q at unit m for job j	[-]

参考文献

- 1) ANSI/ISA-S88.01; "Batch Control, Part1; Models and Terminology", ANSI/ISA-S88.01; 27-43 (1995)
- 2) Orcun, S., S. Clark and G. Joglekar; "An Iterative Optimization Simulation Approach to Identify Risk Parameters for Scheduling under Uncertain Processing Conditions", AIChE2001 Annual Meeting, Batch Plants Overview, November 4-9(2001)

第3章

バッチプロセスにおける進捗管理支援システム

バッチプロセスでは、様々な要因により各工程の所要時間が変動する。所要時間の変動によるスケジュールの遅れは生産性の低下や作業ミスの原因となるため、できるだけ早くもとのスケジュールに戻ることが望ましい。本章では実際に遅延が発生したとき、復旧方法をオンラインでガイダンスするシステムを提案する。提案するシステムでは、まず遅延発生時に取り得る対策を戦略として分類し、戦略ごとに各工程の短縮可能時間と短縮に要するコストを定義した。そして、復旧するまでに許されるバッチ数の制約下で復旧に要するコストを評価として所要時間を短縮する工程とその短縮時間を導出する手法を提案した。提案した最適化手法を組み込んだ遅延回復支援システムのプロトタイプシステムを開発し、その有効性についてシミュレーションにて評価した。

3.1 緒言

バッチプロセスは多品種少量生産に適しているものの、時間と共にプロセスの状態が変化するため、運転スケジュールを適切に定めないと生産効率の悪いプロセスとなってしまう。しかしながら、様々な不確定要因のため、レシピで規定されている条件や手順で製造しているにもかかわらず、目標品質を得るための所要時間が変動することは避けられない。

所要時間の変動はあらかじめ定めたスケジュールに影響を与え、生産効率を悪化させるばかりでなく、遅延に伴う作業ミスの誘発や納期の遅延を引き起こす。また、物流や検査等他部門のスケジュールにも影響を与える。変動が大きい場合は、変動結果を初期条件として、再スケジューリングが実施され、新たなスケジュールが作成される。しかしながら、すべての変動に対して再スケジューリングを行うのは現実的でなく、小さな変動に対してはバッチ間にあらかじめ設けられたバッファ時間や余裕のある作業の操作時間を短縮してスケジュールの修復が試みられる。従来、このような調整は製造部門において技術者の経験に基づいて行われていた。

第2章において、バッチプロセスの製造工程には、コストや人手をかければ所要時間を短縮できる工程があることを考慮して、バッチ間に挿入すべきバッファ時間をシステムティックに導出する方法を提案した。提案した手法を用いることにより、あらかじめ定めた範囲の遅延であれば遅れが生じたバッチ、装置、工程に関わらず、あらかじめ定めたバッチ数以内で動的に遅延を吸収できるスケジュール立案が可能である。しかし、第2章で提案した手法は生産スケ

ジュール立案時にオフラインで利用するための手法であり、運転開始後実際に遅延が発生した場合にどのように対処すべきかについて、具体的な方法は示していなかった。

そこで本章では、前章の手法で立案されたスケジュールで運転されているバッチプロセスにおいて、実際に遅延が発生した場合の具体的な対処方法を運転員に提示する手法を提案する。各バッチでの1つ1つの処理工程を要素とみなせば、その要素の処理順序は技術的に定まっている。よって、各バッチの処理順と処理装置が与えられたとき、上記各要素の処理の順序関係は定まる。処理順序の定まった要素の処理開始時刻の決定問題は、プロジェクトスケジューリング問題として古くから研究が進められている。Sekine¹⁾は、P A R TやC P Mに関して具体的な計算方法を紹介している。Huercio ら²⁾やFujimura ら³⁾はオンラインでのスケジューリングおよびガントチャート表示機能を提案しているが、そこでは遅延発生分を元に戻すというコントロールの概念は示していない。

これらの点を踏まえ本章では、バッチプロセスを対象にC P Mとリアルタイムガントチャートの考え方を発展させて、遅延発生時の状況に応じた戦略を設定することにより進捗管理に柔軟性を持たせるとともに、オンラインで遅延発生時の復旧方法に関するガイダンスを提示する運転支援システムを提案する。

3.2 遅延復旧を考慮したスケジュール

3.2.1 対象プロセス

本章では、説明を簡単にするため直列につながれたM基のバッチ装置からなるプロセスを対象とする。プロセスが複雑な構造を持つ場合への提案手法の拡張については、3.6 節にて説明する。

対象とする製品の1バッチの処理全体を1つのジョブと呼び、ジョブの各装置での処理順序は与えられていることを前提とする。N個のジョブを対象とし、各ジョブの装置間での追い抜きはないとする。装置間に中間貯留タンクはなく、移送工程はその次の装置の受入工程と同期する。そして、計画段階では、装置での処理が終了した時点で直ちに次装置へ移送し、装置内で無駄に保持はしないものとする。

3.2.2 工程所要時間の短縮

一般に、原材料の仕込み処理やろ過器のフィルタ交換、洗浄等の作業員が関与する作業は、余裕を持って工程の所要時間が設定されている。言い換えれば、余裕を取らずに作業したり、作業人数を一時的に増員したりすることにより所要時間の短縮が可能である。また加熱や冷却操作は、処理方式やその熱媒もしくは冷媒を変更することにより所要時間の短縮が可能なケースもある。たとえば、インナーコイルとジャケットのどちらかを単独で使用するか併用するか、あるいは再冷水と冷凍水のどちらを利用するかなど、パネル盤のスイッチの切り替えという簡単な操作で工程の所要時間を変えることができ、それにともない処理コストも変化する。

このように、バッチプロセスでは、運転員にわずかな負荷をかけることやコストをかけることにより所要時間を短縮することが可能となるケースがある。本章では、所要時間の短縮方法として、運転員に負荷をかける方法と、冷熱媒等ユーティリティの種類を変更する方法に分類し、それぞれをコントロール方式と呼ぶことにする。そして、各工程に対してレシピ情報としてコントロール方式ごとに、短縮可能時間および単位時間の短縮に必要なコストの情報が設定されているとする。

- 1) 運転員対応のコントロール方式：運転員の作業負荷増による所要時間短縮
- 2) 用役対応のコントロール方式：利用する用役の変更、増量による所要時間短縮

本章では、所要時間の短縮法を上記の2種類のコントロール方式に分類したが、対象プロセスの特徴を考慮して3種類以上に分類しても構わない。いずれのコントロール方式を採用するにせよ、所要時間を変えることができない工程では短縮可能時間およびコストは0とする。運転員対応のコントロール方式を採用した場合、現実には費用は発生しない。しかしながら、運転員への負担増はできるだけ避けるべきであることから、その負担増を数値化し、コストとして表現できるものとした。

3.2.3 遅延復旧を考慮したスケジュール作成法

実際の運転では必ずしもあらかじめ定めたスケジュール（以後、初期スケジュールと呼ぶ）通りに運転が進捗するとは限らない。あるジョブのある工程の所要時間が標準所要時間より延びた場合、そのジョブが初期スケジュールを守れないのはやむをえない。しかしながら、運転員の作業段取りに与える外乱、他の系列とのインターラクションを考えると、できるだけ短期間で初期スケジュールに戻すことが望ましい。このような観点から前章では、運転開始後あらかじめ想定した大きさの所要時間の遅延が発生した際に、あらかじめ定めたバッチ数以内に元の初期スケジュールに戻すことができるスケジュール作成法を提案した。前章で提案した遅延復旧を考慮したスケジュール作成法について、簡単に説明する。

提案手法では、各ジョブについて各装置の各工程での所要時間に対して、考慮すべき最大の遅れ時間がレシピ情報として設定されているものとする。この値は、各工程の所要時間に対して、その変動の標準偏差がわかっているならば、その何倍という形で与えても良いし、経験により設定しても良い。そして、いずれかの工程の所要時間がその最大値だけ延びた場合に、あらかじめ定めたバッチ数以内に遅延を復旧できるスケジュールを可能スケジュールと定義する。遅延復旧のためにはジョブ間にとるバッファ時間の調整と前節で説明したコントロール方式が使えるものとする。ここで、バッファ時間とは、スケジュール作成時にバッチ間に与える時間余裕であり、各装置での2つのジョブ間の遊休時間の中の最小値（ボトルネック工程での遊休時間）である。

各工程の所要時間の短縮に使えるコントロール方式が前項に示した2種類であるとき、可能な戦略としては以下の4通りが考えられる。

- ・使用可能なコントロール方式すべてを適用する

(以後、生産機会重視戦略と呼ぶ)

- ・運転員対応コントロール方式のみを適用する

(以後、運転員対応戦略と呼ぶ)

- ・用役対応コントロール方式のみを適用する

(以後、用役対応戦略と呼ぶ)

- ・ジョブ間のバッファ時間のみで対応する

(以後、バッファ時間利用戦略と呼ぶ)

ジョブ j のいずれかの装置のいずれかの工程の所要時間がその最大値だけ遅延しても、 H バッチ後のジョブが変動の影響を受けないように制御するためにジョブ間のバッファ時間が満たすべき制約は、以下の手順で求められる。

- 1) ジョブ間に待ち時間をとらないという条件で、最早スケジュールを作成する。
この際、1つのジョブを構成する工程間においても待ち時間無しで操作する。
- 2) ジョブ j の各装置の工程に設定した最大遅れ時間に対して、ジョブ j からジョブ $j + H$ の間で使える処理時間短縮方法すべてを用いて、できるだけ早く処理するスケジュールを生成する。
- 3) ジョブ $j + H$ の最後の装置の開始時刻の 1) で求めた最早スケジュールからの遅れを計算する。
- 4) ジョブ j のすべての装置に対して求めた遅れの最大値を d_j^* とする。

ただし、この値が負になった場合は 0 とする。

- 5) ジョブ j のいずれかの工程で最大の遅延が生じた際にジョブ $j + H$ を遅らさずに運転できる条件は、ジョブ j からジョブ $j + H$ の間に d_j^* 以上のバッファ時間を持たせることである。

ジョブ j とジョブ $j + 1$ の間に設定するバッファ時間を b_j とすれば、ジョブ 1 からジョブ $J - H$ のある装置で遅延が生じたとき、 H バッチ後のジョブに影響を与えない条件は以下ようになる。

$$b_j + b_{j+1} + \cdots + b_{j+H-1} \geq d_j^* \quad (j = 1, 2, \dots, J-H) \quad (3.1)$$

$$b_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J-1) \quad (3.2)$$

Eqs. (3.1)、(3.2) の不等式を満たす $J - 1$ 個の変数 b_j が存在することは明らかである。

上式を満たす中で、ジョブ J の終了時刻を最も早くする b_j は、上式を制約として、

$$B = b_1 + b_2 + \cdots + b_{J-1} \quad (3.3)$$

を最小にする線形計画問題を解くことにより求めることができる。

第2章では、線形計画問題を解かずに簡単な計算で可能解を導出する手順についても、提案した。

3.3 所要時間短縮工程の決定

3.3.1 問題設定

3.2 節で示した方法でスケジュールを作成することにより、あらかじめ与えた範囲内の変動であれば、あらかじめ与えたバッチ数以内に元のスケジュールに修復できる。しかしながら、この方法は、実際に遅延が生じた際にどの工程の所要時間を短縮すべきかについては示していない。操作所要時間の遅延により各ジョブ間で最も余裕の無い装置、すなわちクリティカルパス上の工程が、初期スケジュールから変化する可能性もある。また、コントロールによる工程の所要時間の短縮により、クリティカルパス上の工程は動的に変化する。よって、あるジョブのある工程に遅延が発生したとき、元のスケジュールに戻すためにどのジョブのどの工程の所要時間を短縮すればよいかを経験のみで判断することは困難である。

このような観点から本章では、運転中に所要時間の変動が発生した際に、最小のコストであらかじめ定めた初期スケジュールに戻す手順を導出する以下の問題を検討する。

< 所要時間短縮工程決定問題 >

N 個のジョブがあらかじめ定められた初期スケジュールに従って運転されているものとする。また、各工程の所要時間の短縮に使えるコントロール方式も既知とする。このような条件下で、あるジョブ（ジョブ L とする）のある工程に遅延が発生したとき、あらかじめ定めたジョブ数 H 以内に初期スケジュールに戻すような工程の所要時間の短縮方法の中で、コストを最小にする方法を求めよ。ただし、各処理の開始時刻は初期スケジュールの開始時刻よりも早くしてはならず、また、ジョブ L と $L + H$ の各工程の所要時間は短縮しないものとする。

3.3.2 所要時間に関する制約条件

上記の問題設定において、ジョブ L にて遅延が発生して遅くともジョブ $L + H$ には初期スケジュールに戻すことを想定していることから、ジョブ L から $L + H$ の範囲で考えれば良い。

説明を簡単にするために各装置での操作は、受入工程、処理工程、払出工程、洗浄工程の4工程からなるものとする。

ここで、ジョブ j の装置 m における受入工程の開始時刻を $t_{j,m,1}$ 、処理工程の開始時刻を $t_{j,m,2}$ 、

払出工程の開始時刻を $t_{j,m,3}$ 、洗浄工程の開始時刻を $t_{j,m,4}$ とする。

また、レシピで設定されている各工程の標準所要時間を $P_{j,m,1}$ 、 $P_{j,m,2}$ 、 $P_{j,m,3}$ 、 $P_{j,m,4}$ 、各工程の処理の運転員対応による短縮時間を $U1_{j,m,1}$ 、 $U1_{j,m,2}$ 、 $U1_{j,m,3}$ 、 $U1_{j,m,4}$ 、そして、用役対応による短縮時間を $U2_{j,m,1}$ 、 $U2_{j,m,2}$ 、 $U2_{j,m,3}$ 、 $U2_{j,m,4}$ とする。このとき、任意のジョブ j の装置 m における各工程の開始時刻と工程の所要時間および2つのコントロール方式を適用した際の短縮時間の関係は以下ようになる。

$$t_{j,m,k} + P_{j,m,k} - U1_{j,m,k} - U2_{j,m,k} \leq t_{j,m,k+1} \quad (j=L, L+1, \dots, L+H; \quad m=1, 2, \dots, M; \quad k=1, 2, 3) \quad (3.4)$$

各装置の払出開始時刻が次の装置の受入開始時刻となる。この関係は以下のように表せる。

$$t_{j,m+1,1} = t_{j,m,3} \quad (j=L, L+1, \dots, L+H; \quad m=1, 2, \dots, M-1) \quad (3.5)$$

$$U1_{j,m+1,1} = U1_{j,m,3} \quad (j=L, L+1, \dots, L+H; \quad m=1, 2, \dots, M-1) \quad (3.6)$$

$$U2_{j,m+1,1} = U2_{j,m,3} \quad (j=L, L+1, \dots, L+H; \quad m=1, 2, \dots, M-1) \quad (3.7)$$

ジョブ j の装置 m での洗浄工程が終了しなければ、次のジョブの受入工程は開始できない。この関係は次式で表される。

$$t_{j,m,4} + P_{j,m,4} - U1_{j,m,4} - U2_{j,m,4} \leq t_{j+1,m,1} \quad (j=L, L+1, \dots, L+H-1; \quad m=1, 2, \dots, M) \quad (3.8)$$

各工程における運転員対応による短縮可能時間の最大値および用役対応による短縮可能時間の最大値 $U1_{j,m,k}^*$ 、 $U2_{j,m,k}^*$ ($k=1,2,3,4$) は、あらかじめレシピに設定されているものとする。

よって、3.2 節で説明したさまざまな戦略から1つの戦略を定めることにより、コントロール可能時間の最大値が定まる。すなわち、

生産機会重視戦略（すべてのコントロール方式を利用）のとき、

$$U1_{j,m,k} \leq U1_{j,m,k}^* \quad , \quad U2_{j,m,k} \leq U2_{j,m,k}^* \quad (3.9a)$$

用役対応戦略（用役変更でのみ対応）のとき、

$$U1_{j,m,k} = 0 \quad , \quad U2_{j,m,k} \leq U2_{j,m,k}^* \quad (3.9b)$$

運転員対応戦略（運転員の作業変更でのみ対応）のとき、

$$U1_{j,m,k} \leq U1_{j,m,k}^* \quad , \quad U2_{j,m,k} = 0 \quad (3.9c)$$

バッファ時間利用戦略（コントロールしない）のとき、

$$U1_{j,m,k} = 0 \quad , \quad U2_{j,m,k} = 0 \quad (3.9d)$$

である．

また、ジョブ L およびジョブ $L+H$ については操作時間の短縮を行わないことから、すべての装置、工程に対して、

$$U1_{L,m,k}^* = U2_{L,m,k}^* = U1_{L+H,m,k}^* = U2_{L+H,m,k}^* = 0 \quad (3.9e)$$

である．

各操作を初期スケジュールでの開始時刻より早く行わないことから以下の制約が付加される．

$$t_{j,m,k} \geq t_{j,m,k}^* \quad (j = L, L+1, \dots, L+H; m=1, 2, \dots, M; k = 1, 2, 3, 4) \quad (3.10)$$

ここで、 $t_{j,m,k}^*$ は、ジョブ j の装置 m の工程 k の初期スケジュールでの開始時刻である．

ジョブ L における装置 m の s 番目の工程の標準所要時間が d だけ遅延した場合、この遅延は以下のようにその工程の開始時刻の遅れとして表現できる．

$$t_{L,m,s} = t_{L,m,s}^* + d \quad (3.11)$$

3.3.3 評価関数

ジョブ j の装置 m での各工程の所要時間 $P_{j,m,k}$ を、運転員対応のコントロールにより単位時間短縮した際のコストおよび、用役対応のコントロールにより操作時間を単位時間短縮した際のコスト $C1_{j,m,k}$ 、 $C2_{j,m,k}$ ($k = 1, 2, 3, 4$) はあらかじめレシピに設定されているものとする．

評価関数としては、以下の式を採用した．

$$z = \left\{ \sum_{j=L+1}^{L+H-1} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^4 (C1_{j,m,k} U1_{j,m,k} + C2_{j,m,k} U2_{j,m,k}) \right\} + \alpha (t_{L+H,M,4} - t_{L+H,M,4}^*) \quad (3.12)$$

上式右辺第1項は短縮のコストを、第2項はジョブ $L+H$ までに初期スケジュールに戻せなかった際のペナルティ項である． α は重み係数を表し、通常、納期を守れなかった場合の顧客に対する賠償金や後段に連続プロセスが連なっているようなハイブリッドプロセスの場合の生産量減少等の想定される被害金額をベースに決定される． α を $C1_{j,m,k}$ 、 $C2_{j,m,k}$ に比べてかなり

大きく設定することにより、遅れを戻すことを優先した評価とすることができる。

以上の説明より、各操作の最適な短縮時間を求める問題は Eqs. (3.4) - (3.11) および変数の非負制約の下、Eq. (3.12) を最小にする各操作の開始時刻および短縮時間を求める最適化問題となる。

3.4 支援システム

3.4.1 変動時の対応

前節において最適な処理開始時刻を求める問題が、線形計画問題として定式化できることを示した。現実のプラントでは、どのジョブのどの工程で遅延が発生するかわからない。本章で提案するシステムはオンラインでの利用を前提としていることから、遅れが発生した際に効率良く最適化問題を計算機内に構築し解く必要がある。そこで本節では、オンラインでの運用を想定して開発した遅延回復支援システムのプロトタイプシステムの概要を説明する。

シーケンス制御により自動運転されているバッチプロセスであれば、装置別にジョブ開始、ジョブ終了、および各工程の終了を通知する信号（イベント）をシーケンスに定義し、かつ、装置別に現在運転中のジョブ No. とレシピ No. を記憶しておくことにより、以下の処理の流れにて運転支援システムが構築できる。

一定周期（例えば1分）でイベントを監視する。

イベントの発生を検知した際に、発生装置、発生ジョブ No.、該当レシピ No.、イベントの内容を把握する。

イベント発生時刻と立案されたスケジュール上の時刻と比較し、遅延の有無を確認する。

遅延があれば、対策を取るか否かを判断（運転員の判断）する。

対策を施さない場合はへ戻る。また、再スケジュールリングが必要と判断した場合はスケジュールリングシステムに情報を伝達する。製造部門で対応すべきと判断された場合は次に進む。遅延回復支援システムに対して必要情報を送付する。

遅延回復支援システムが与えられた戦略、コスト等の情報に基づいて各ジョブの最適な開始時刻を算出する。

また、運転員の要求により遅延回復のためのガイダンス情報を提供する。

3.4.2 入力情報

前節のステップで必要とされる情報について示す。

ジョブ j に関する変数ベクトル X_j を次のように定義する。ここで、上付きの T は転置を意味する。

$$X_j = [x_{j1} \ x_{j2} \ \cdots \ x_{jm}]^T \quad (3.13)$$

ただし、 x_{jm} はジョブ j の装置 m に関する以下の変数ベクトルである。

$$x_{jm} = [t_{jm1} \ t_{jm2} \ t_{jm3} \ t_{jm4} \ U1_{jm1} \ U2_{jm1} \ U1_{jm2} \ U2_{jm2} \ U1_{jm3} \ U2_{jm3} \ U1_{jm4} \ U2_{jm4}]^T \quad (3.14)$$

この X_j を用いれば、Eq.(3.4)の関係は Eq. (3.15)のように、Eqs.(3.5) - (3.7)の関係は Eq.(3.16)のように、また Eqs.(3.9)、(3.10)の関係はそれぞれ Eqs.(3.17)、(3.18)のように表すことができる。

$$A_1 X_j \geq B_{1j} \quad (j=1,2,\dots) \quad (3.15)$$

$$A_2 X_j = 0 \quad (j=1,2,\dots) \quad (3.16)$$

$$A_3 X_j \geq B_{3j} \quad (j=1,2,\dots) \quad (3.17)$$

$$A_4 X_j \geq B_{4j} \quad (j=1,2,\dots) \quad (3.18)$$

ここで、 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 は各式の係数からなる j に依存しない行列である。

B_{1j} はジョブが定まればレシピ情報から値がすべて定まる定数ベクトル、 B_{3j} は用いる戦略が定まればレシピ情報から値がすべて定まる定数ベクトル、 B_{4j} は初期スケジュールでの開始時刻からなる定数ベクトルである。

2つのジョブの変数間関係である Eq.(3.8)は、以下のように表現できる。

$$A_5 [X_j \ X_{j+1}] \geq B_{5j} \quad (j=1,2,\dots) \quad (3.19)$$

ここで A_5 は j に依存しない行列であり、また B_{5j} は装置 j の標準洗浄時間からなる定数ベクトルである。

ジョブ L の遅延に関する制約式 Eq.(3.11)は次式で表現できる。

$$A_6 X_L = B_6 \quad (3.20)$$

ここで A_6 は遅延発生工程を特定するための横ベクトル、 B_6 は遅延の大きさに依存する定数である。

注目すべき点は、 A_1 から A_5 の構造がジョブに依存しないことである。よって、係数行列をあらかじめ遅延回復支援システムに一度与えておけば、遅延発生時に同システムに与えるべき情報は、以下の項目に限定できる。

遅延発生ジョブの No.

遅延発生装置および発生工程の No.

遅延時間

初期スケジュールに戻したいジョブ数 H

コントロール戦略

これらの情報を与えることで、Eqs.(3.15) - (3.20)の右辺の定数ベクトルおよび Eq.(3.20)の A_6 の情報、および評価関数の係数ベクトルの情報が定まる．よって、上記の情報を遅延回復支援システムに送ることにより、遅延発生状況下での最適な所要時間短縮法を算出することができる．このように本章の方式では、遅延回復支援システムとのインタフェース情報が非常にシンプルであるため、オンラインでの運用に適しており現実的な方式であると考えられる．今回、線形計画問題を解くためのソルバーとして Windows XP の環境で実行可能なフリーソフトの Lp_solve 5.5.0.10 を採用した．必要な情報の入力とそのソルバーへの伝達、および計算結果をガイダンスとして表示するインタフェースは、マイクロソフト社の MS-EXCEL にて作成した．インタフェースの画面表示例を Figure 3.1 に示す．画面の詳細については 3.5 節で説明する．

Operation Support System

Production Planning Product A 1 Product C 2 Product B 1 Product A 2 Close

Start Time (Sum of minute expression) 0

Earliest Schedule Earliest Schedule Generate

Strategic Schedule Recovery Job → 3 Jobs after Strategic Schedule (Non Controlled) Generate

Strategy ☒ Maximum Production ☐ UTT Change Control ☐ Work Change Control

Strategic Schedule (Controlled) Generate

Influence of Delay Delay Occurred → Job No 1 Unit No 3 Operation No 2 Prediction of Influence Delay Influence Gantt Chart

Optimization

Constraint Generate

Guidance Display

Work Change Cost [KYen] 11.0

UTT Change Cost [KYen] 38.0

Delay Penalty Cost [KYen] 0.0

Total Cost [KYen] 49.0

Optimized Gantt Chart Display

Progress Control Guidance

Job No: 2	Unit No: 3	Target: Processing	Control Time: 10min
Job No: 2	Unit No: 3	Target: Discharging	Control Time: 3min
Job No: 2	Unit No: 4	Target: Receiving	Control Time: 3min
Job No: 3	Unit No: 1	Target: Discharging	Control Time: 4min
Job No: 3	Unit No: 2	Target: Receiving	Control Time: 4min
Job No: 3	Unit No: 2	Target: Processing	Control Time: 5min

Job No: 2	Unit No: 3	Target: Processing	Control Time: 17min
Job No: 3	Unit No: 2	Target: Processing	Control Time: 21min

Fig. 3.1 Control guidance under maximum production strategy

実際に製造現場にて利用されているバッチコントロールシステムに本章で提案した運転支援機能を付加した構成図を Figure 3.2 に示す．図中の破線部が開発した遅延回復支援システムである．レシピ管理システムは、工程進捗管理システムから得られたスケジュールに基づいてレシピ情報を取り込み、コントローラに伝達する．コントローラはその情報を元に各バッチを実行し、プロセスから発生するイベント信号をイベント管理システムに送付する．工程進捗に関わる情報は、イベント管理システムから工程進捗管理システムに送られ、操作の進捗状況がガ

ントチャートで表示される．遅延が発生したとき、その情報は今回開発した遅延回復支援システムへ送付され、その状況がガントチャートに表示される．運転管理者は遅延回復支援システムにより定めた戦略の下での遅延回復スケジュールを確認する．そしてその情報を元に、コントロールを実施するか、または再スケジュールリングを実施するかを判断する．

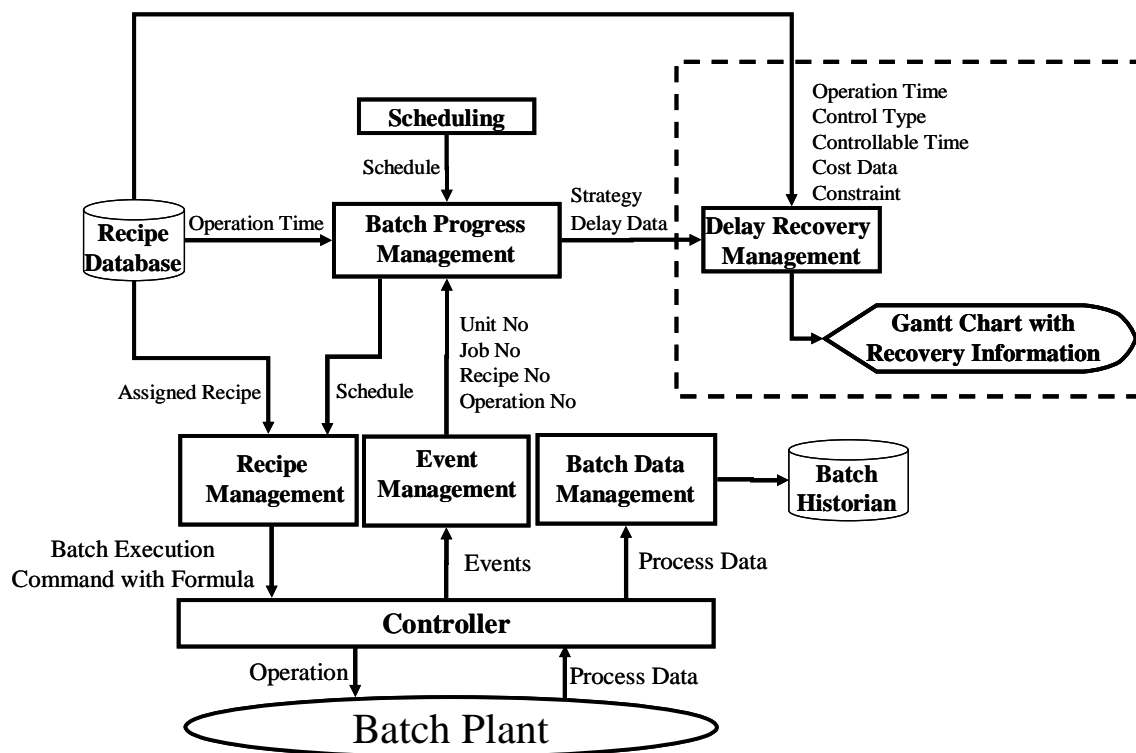


Fig. 3.2 Batch control system

3.5 シミュレーションによる検証

3.5.1 対象プロセス

本章で提案した遅延回復支援システムの有効性をシミュレーションにて検証した．本章では Figure 3.3 の Type 1 のプロセスを対象とした．このプロセスは、Unit 1 から Unit 5 の 5 基のバッチ装置から構成され、すべてのジョブはこの番号順に装置を使用する．各ジョブの各装置での操作は、受入、処理、移送、洗浄の 4 工程からなる．

スケジュール対象の製品は A、B、C の 3 種類であり、そのレシピを Table 3.1 に示す．各装置の各工程で予想される最大遅延時間を Max. Delay Time 欄に、コントロール可能時間および単位時間の短縮に必要なコストを Controllable Time & Cost Data 欄に示した．コントロール方式としては、運転員の作業変更および用役変更の 2 種類とした．

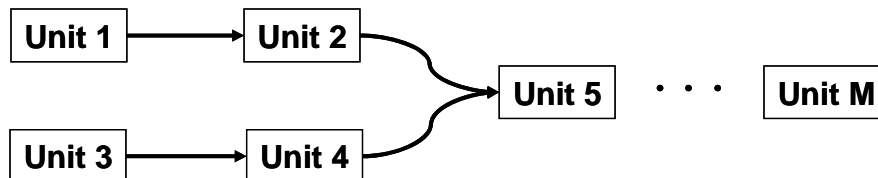
Type 1**Type 2****Line 1****Line 2****Type 3**

Fig. 3.3 Target process

Table 3.1 Target recipe

Time : [min] , Cost : [kYen/min]																			
Product A								Product B						Product C					
Unit No	Operation Type	Oper - ation Time	Max. Delay Time	Controllable Time & Cost Data				Oper - ation Time	Max. Delay Time	Controllable Time & Cost Data				Oper - ation Time	Max. Delay Time	Controllable Time & Cost Data			
				Work Change		UTT Change				Work Change		UTT Change				Work Change		UTT Change	
				Time	Cost	Time	Cost			Time	Cost	Time	Cost			Time	Cost	Time	Cost
1	Charging	20	0	0		0		20	0	0		0		20	0	0		0	
	Processing	150	69	0		3	1.00	120	69	6	0.50	5	1.00	160	51	13	0.50	11	1.00
	Discharging	20	0	5	0.50	0		20	0	0		0		20	0	4	0.50	0	
	Cleaning	30	0	0		5	0.50	30	0	0		10	0.50	20	0	0		0	
2	Charging	20	0	5		0		20	0	0		0		20	0	4	0.25	0	
	Processing	160	99	10	0.50	5	1.00	190	90	12	0.50	4	1.00	160	33	5	0.50	28	1.00
	Discharging	20	0	0		0		20	0	5	0.50	0		20	0	0		0	
	Cleaning	30	0	0		10	0.50	40	0	0		12	0.50	20	0	0		0	
3	Charging	20	0	0		0		20	0	5	0.25	0		20	0	0		0	
	Processing	170	102	10	0.50	5	1.00	180	111	6	0.50	8	1.00	160	27	10	0.50	17	1.00
	Discharging	20	0	0		0		20	0	0		0		20	0	3	0.50	0	
	Cleaning	80	0	0		20	0.50	40	0	0		10	0.50	20	0	0		0	
4	Charging	20	0	0		0		20	0	0		0		20	0	3	0.25	0	
	Processing	170	96	8	0.50	12	1.00	190	90	13	0.50	18	1.00	140	33	8	0.50	16	1.00
	Discharging	20	0	0		0		20	0	0		0		20	0	0		0	
	Cleaning	30	0	0		6	0.50	30	0	0		6	0.50	40	0	0		10	0.50
5	Charging	20	0	0		0		20	0	0		0		20	0	0		0	
	Processing	90	27	6	0.50	0		150	108	10	0.50	15	1.00	160	27	8	0.50	17	1.00
	Discharging	20	0	0		0		20	0	0		0		20	0	0		0	
	Cleaning	60	0	0		14	0.50	40	0	0		5	0.50	20	0	0		0	

3.5.2 シミュレーション結果

対象プロセスにおいて、生産機会重視戦略のもとで作成された初期スケジュールに対して遅延が発生したケースを例に検証する。

ジョブ1からジョブ6で製造する製品がA、C、C、B、A、Aである製造スケジュールに対して、ジョブ1の装置3の処理工程で最大の遅延が発生したケースを検証した。初期スケジュールに戻したいジョブ数 H を3とし生産機会重視戦略をとるものとした。

本ケースのガイダンス画面を Figure 3.1 に示す。図中の Influence of Delay 欄に、遅延が発生したジョブ、装置、工程の No. が表示される。

また、初期スケジュールに戻すのに必要なコントロールの内容が Progress Control Guidance 欄に運転員対応のコントロール方式(Work Change)と用役対応のコントロール方式(UTT Change)に分けて示される。そして、図中の左下欄にその際のコスト情報が表示される。それから、Optimized Gantt Chart Display ボタンを押すことにより、Figure 3.4 のような遅延発生ジョブ以降 H バッチ分のガントチャートが表示される。

ガントチャートは、上段と下段に分かれており、上段にコントロールを実施しない場合(Non-Controlled)を表し、下段にガイダンス通りコントロールを実施した場合(Controlled)を表示する。そして、それぞれのガントチャートはユニット毎に初期スケジュール(Initial)と遅延発生後のスケジュール(Delay)を上下に対比させて表示する。ここで斜線が施された矩形は、遅延が発生したジョブおよび装置を表す。また、図中破線で縁取りされた矩形は、ガイダンスで示されているコントロール対象のジョブおよび装置であり、その中の濃く塗りつぶされた部分はコントロール対象の工程を表している。

ガイダンス画面の Strategy を変更することにより戦略を変えられる。これは、当初ある戦略にて初期スケジュールを立てていたが、運転員の体調やユーティリティ設備のトラブル等何らかの事情で戦略を変更する必要性が発生した場合を想定している。対象装置/工程における最大遅延時間でなければ、他の戦略でも吸収できる可能性があるので、それを確認できるようにしている。1例として、生産機会重視から運転員に負荷を与えない用役対応に変更した場合のガントチャートを Figure 3.5 に示す。戦略変更の結果、用役対応のコントロールのみでは吸収できない遅延であることがわかる。そこで、ガイダンス画面の Strategic Schedule 欄の初期スケジュールに戻したいジョブ数 H (Recovery Job)を4に変更すれば、Figure 3.6 に示すように4ジョブ目では遅延は吸収されることがわかる。戦略を変更してあらかじめ定めたジョブ数 H 以内で遅れを吸収できない場合は、遅延を吸収できるまで H を増やし、その期間が戦略上許容できるものであれば、そのガイダンスに従えばよい。許容できない場合は戦略を変更するか、あるいはスケジュールの見直しを実施する等の対応が必要となる。そして、提案したシステムは、そのようなさまざまな対応を検討するツールとしても有効である。

以上、例題により、従来運転員に委ねられていた進捗コントロールに対して、戦略に応じたガイダンスをシステムティックに提供することが可能であることがわかり、提案した手法の有効性が確認できた。

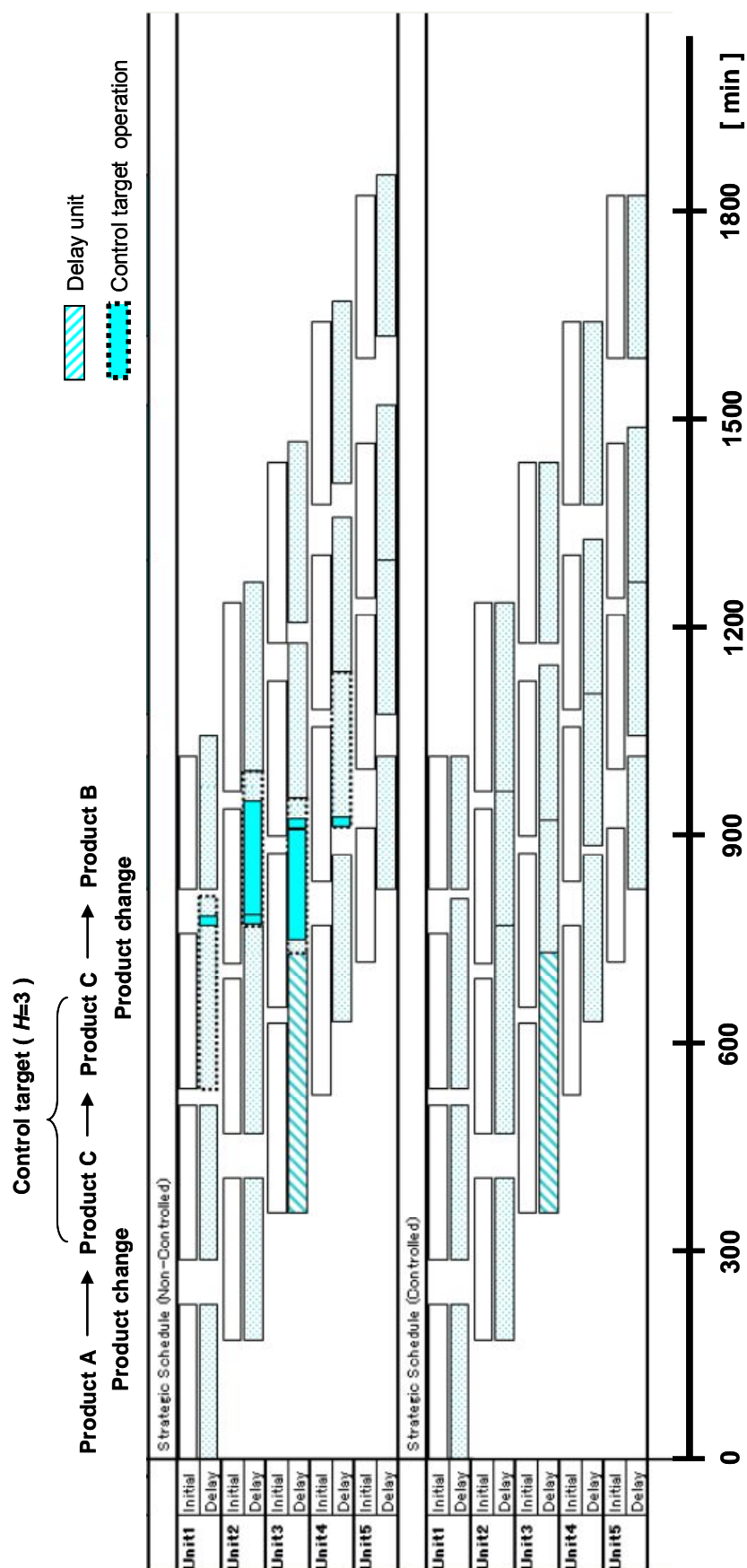


Fig. 3.4 Optimized gantt chart under maximum production strategy

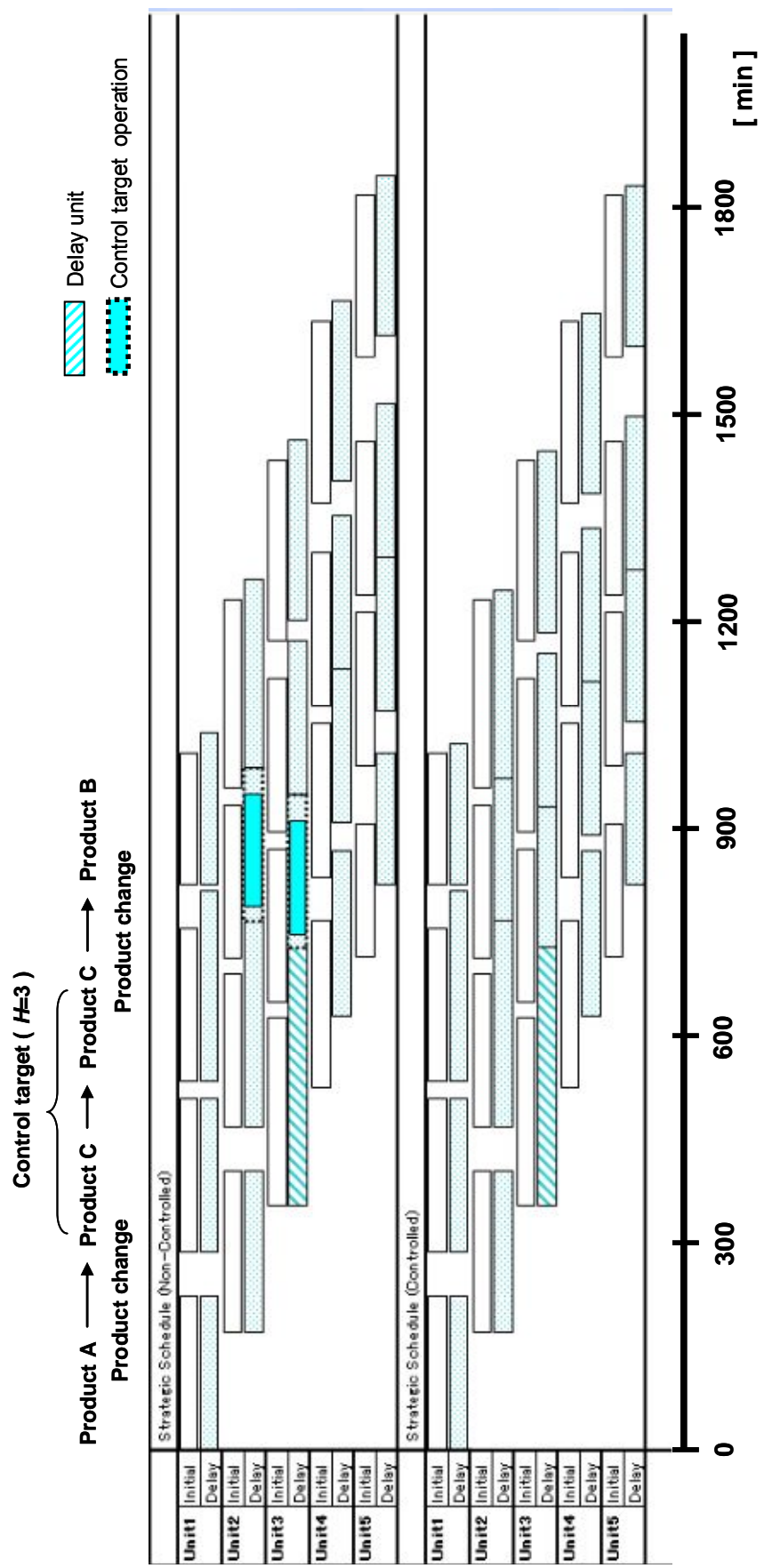


Fig. 3.5 Optimized gantt chart under utility change strategy ($H=3$)

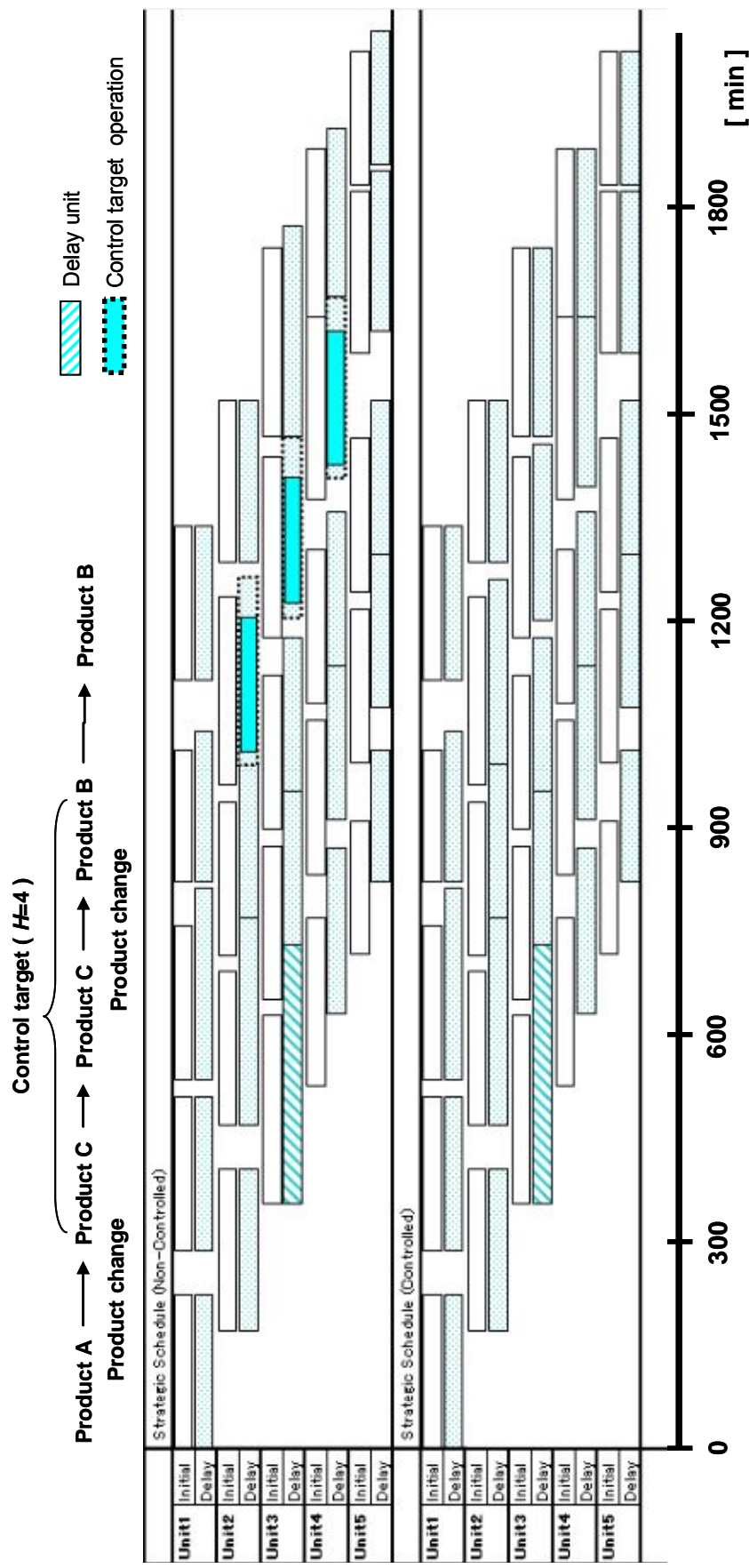


Fig. 3.6 Optimized gantt chart under utility change strategy ($H=4$)

3.6 複雑なプロセスへの拡張

前節までは直列につながれたバッチ装置からなるプロセスを対象に論じてきた．本節では、2系列が共有装置を有する場合や中間製品の混合を含む場合など、複雑な構造を有するプロセスについても、本論文で提案した手法が適用できることを示す．

(1) X型プロセス

Figure 3.3 の Type 2 のように、2つの系列が特定の装置を共有するケースについて考える．

ジョブ j の装置 m における第 k 工程の開始時刻 $t_{j,m,k}^{i(n)}$ の系列 i での値を、上付き添え字を用いて

$t_{j,m,k}^{i(n)}$ と表す．1つの系列内でのジョブの各工程の開始時刻に関する制約は、1系列の場合と

同じであることから、Eqs. (3.4) - (3.8) がそのまま利用できる．共有装置では2つの系列に属するジョブの関係を設定する必要がある．

共有装置でのジョブの処理順が与えられれば、その装置でのジョブ間の処理開始時刻に関する制約は、Eq. (3.8) と同様の以下の式で表すことができる．

$$t_{j(n),m(n),4}^{i(n)} + P_{j(n),m(n),4}^{i(n)} - U1_{j(n),m(n),4}^{i(n)} - U2_{j(n),m(n),4}^{i(n)} \leq t_{j(n+1),m(n+1),1}^{i(n+1)} \quad (3.21)$$

ここで、左辺各変数の添え字は共有装置で n 番目に処理されるジョブに対するもので、 $i(n)$ は属する系列番号、 $j(n)$ はジョブ番号、 $m(n)$ は装置番号を表す．

たとえば、共有装置で8番目に処理されるジョブが系列1のジョブ5、9番目に処理されるジョブが系列2のジョブ4であり、共有装置は系列1では装置3、系列2では装置2である場合、この2つの処理の順序関係は以下のように表すことができる．

$$t_{5,3,4}^1 + P_{5,3,4}^1 - U1_{5,3,4}^1 - U2_{5,3,4}^1 \leq t_{4,2,1}^2 \quad (3.22)$$

よって、共有装置におけるジョブの処理順から得られる $\{i(n), j(n), m(n) : n=1, 2, \dots, J; J \text{ はジョブ数}\}$ の情報に基づいて、Eq. (3.22) を新たに制約に加えることにより、1系列の場合と同様に考えることができる．評価関数については、各系列について Eq. (3.12) で得られる z の和を用いればよい．

(2) Y型プロセス

Figure 3.3 の Type 3 のように中間製品が途中の装置で混合されるケースについて考える．通常このようなケースでは、混合される一方が従属的な装置群（以後、副ラインと呼ぶ）であり、その装置群に属する装置の稼働時間には余裕がある場合が多い．このような場合は、副ラインを除いた1系列プロセスと考えればよい．副ラインを同時に考慮する必要がある場合は、以下のように考えることができる．

説明を簡単にするため、3.5 節までは1つの装置での操作は、受入、処理、払出、洗浄の4工程からなるとしてきた．ここでは一般化し、各装置での操作は K 工程からなるものとする．

装置によって必要な工程数が異なる場合はその最大値を K とし、工程数の少ない装置には処理時間 0 の工程を追加する。このように考えると、装置間の流れの結合関係は、(払出装置 No. , 払出工程 No. , 受入装置 No. , 受入工程 No.) の組で表すことができる。すべての装置での流れの結合関係からなる集合を S とすれば、装置間の払出と受入の制約条件である Eqs. (3.5) - (3.7) の関係は、以下の式で表現できる。

$$t_{j,m,k} = t_{j,m',k'} \quad (3.23)$$

$$U1_{j,m,k} = U1_{j,m',k'} \quad (3.24)$$

$$U2_{j,m,k} = U2_{j,m',k'} \quad (3.25)$$

ここで、 $(m, k, m', k') \in S, j=1, 2, \dots, J$ である。

例えば、装置 5 の第 1 単位操作が装置 2 の第 3 単位操作からの受入で、装置 5 の第 3 単位操作が装置 4 の第 3 単位操作からの受入であれば、 S は (5, 1, 2, 3)、(5, 3, 4, 3) という要素を含み、開始時刻の制約条件は次式となる。

$$t_{j,2,3} = t_{j,5,1} \quad (3.26)$$

$$t_{j,4,3} = t_{j,5,3} \quad (3.27)$$

このように装置間の入出力関係を一般化しても、各装置での関係式は変化しないことから、入力情報としては 3.4.2 項の Eq. (3.16) の係数行列が変化するのみで、他の入力情報は変化しない。よって、上述した部分を修正するのみで前章までの手法を適用できる。

3.7 結言

あらかじめ定めた範囲の操作の遅れに対して、各工程の所要時間が短縮可能という条件下で、あらかじめ定めたバッチ数以内で遅延を吸収するために、バッチ間に挿入すべきバッファ時間をシステムティックに導出する方法を前章において提案した。本章では実際に遅延が発生したとき、遅延発生状況に応じて柔軟に戦略を指定し、それに基づいた復旧方法をオンラインでガイダンスするシステムを提案した。提案したシステムでは、遅延発生時に少数の情報を入力するのみで、与えた戦略に基づいてコストが最小となる復旧法を提示した。これは、これまで運転員が状況に応じて処理時間を短縮する工程を決めていた考え方に近いものであり、実プロセスに受け入れやすい考え方である。

バッチプロセスに関して、オフラインのスケジューリングの分野では最適化等の様々な研究が報告されてきているが、進捗コントロールの最適化に関する検討は現時点では見当たらない。

これまで経験に基づいて行われてきたスケジュール遅延時の対応に最適化の概念を導入する

ことにより、遅延時の対応の標準化とコスト削減が図れ、プロセスの安定運転にもつながるとともに不確定要素による工程進捗の変動にも対応可能となることが期待できる。

本章では、変動が生じることを前提に議論してきたが、変動を抑制することも重要である。今後、進捗変動要因の排除という観点から不確定な情報を減少させるために、製品品質を作り込むメカニズムの解明、製造条件のレシピからのずれが操作時間に与える影響の明確化、製品品質を決定するプロセス状態量の明確化等に関する研究を進めていく必要がある。

Nomenclature

A_n	= constraint matrix in Eqs. (15) to (20)	[-]
B_{nj}	= constraint vector in Eqs. (15) to (20)	[-]
b_j	= buffer time between job j and job $j+1$ at bottleneck unit	[min]
$C1_{j,m,k}$	= cost of unit time reduction by work change	[kYen/min]
$C2_{j,m,k}$	= cost unit time reduction by utility change	[kYen/min]
d	= delay	[min]
d_j^*	= maximum delay of job $j+H$ when the disturbance occurs at job j	[min]
H	= number of batches in which the disturbance is absorbed	[-]
J	= number of jobs	[-]
K	= number of operations	[-]
M	= number of batch units	[-]
$P_{j,m,k}$	= processing time	[min]
$P_{j,m,k}^i$	= processing time of shared unit	[min]
S	= set which shows the connection of flows	[-]
$t_{j,m,k}^*$	= start time determined by scheduling system	[min]
$t_{j,m,k}$	= start time	[min]
$t_{j,m,k}^i$	= start time of shared unit	[min]
$U1_{j,m,k}$	= control time by work change	[min]
$U1_{j,m,k}^i$	= control time by work change of shared unit	[min]

$U1_{j,m,k}^*$ = maximum control time by work change [min]

$U2_{j,m,k}$ = control time by utility change [min]

$U2_{j,m,k}^i$ = control time by utility change of shared unit [min]

$U2_{j,m,k}^*$ = maximum control time by utility change [min]

$x_{j,m}$ = vector consisting of variables related to unit m for job j
[-]

X_j = vector consisting of variables related to job j [-]

= penalty cost for the delay [kYen]

$i(n)$ = production line number of shared unit [-]

$j(n)$ = job number of shared unit [-]

k = operation number: receiving ($k=1$), processing ($k=2$),
discharging ($k=3$), and cleaning ($k=4$) [-]

$m(n)$ = batch unit number [-]

参考文献

- 1) Sekine, T.; PERT・CPM OR Library 11, 2nd ed., pp. 208 - 225, Nikkagiren Shuppan-sha, Japan (1977)
- 2) Huercio, A., A. Espuna and L.Puigjaner; " INCORPORATING ON-LINE SCHEDULING STRATEGIES IN INTEGRATED BATCH PRODUCTION CONTROL " , *Comput. Chem. Eng.* 19, Suppl., S609 - S614 (1995)
- 3) Fujimura, S. and R. Himono; " Unified Recipe Information Management for Batch Process Control and Scheduling " ,T.IEE Japan, Vol. 122-C, No.5, pp. 843 - 850 (2002)

第4章

不確定要素を考慮したモデル埋め込みレシピの提案と

樹脂コンパウンド製品設計への適用

バッチプロセスでは、レシピに基づいて製造する。そして、顧客から要求される品質を満足する製品を製造するための使用装置、単位操作、原材料の種類／量、温度／圧力等の製造条件を製品毎にレシピとして定義している。しかしながら、装置の劣化／汚れや原材料が必要とする特性、工場の温湿度など製造環境は、製造するタイミング毎に変化する不確定要素であるので、ある特定の状態になっているという前提のもとにレシピを設計しているケースが多いと考えられる。さらに、顧客側での製造環境も不確定であるケースがほとんどである。それゆえ、不完全なレシピに基づいて製造しているのが現状であると言える。

そこで、過去の試作／製造実績に基づいて製造条件と製品品質との関係をモデル化しレシピ情報として取り込むことにより、製造環境の変化に対応させることを考える。本章では、そのようなモデルを有するレシピを「モデル埋め込みレシピ」と呼び、実際に樹脂コンパウンド製品設計に試用することにより、その有効性を確認する。

樹脂コンパウンド製品のひとつである樹脂着色剤は、客先で原料として使用できるかどうかによって評価される。このため、樹脂着色剤メーカーは試作品を顧客に提供し、顧客が品質評価を行う。この品質評価結果は、顧客が使用する樹脂の特性や製造条件に依存する。そしてこれらの情報はメーカーに開示されず、評価結果のみが伝えられるため、メーカーは極めて不確定性の高い状況下で樹脂着色剤を製造するためのレシピ中のパラメータ（原料配合比率）を決定しなければならない。このような背景から、レシピ中のパラメータの決定は熟練技術者の勘と経験に依存した業務になっている。

本章では、これまでに蓄積された試作レシピとその客先評価結果を解析し、原料配合比率から不良品発生率を予測するモデルを構築すると共に、独立成分分析に基づく影響度解析を用いて、レシピ設計段階で予想される不良品発生率が低くなるように原料配合比率を修正できる効率的なパラメータ決定法（以後、この課程をレシピ設計と呼ぶ）を示す。さらに、樹脂着色剤の実プロセスのレシピ情報を用いてモデル埋め込みレシピを構築し、その有用性を検証した結果を示す。

検証の結果、例題として採用したプロセスに対してモデル埋め込みレシピにより決定したレ

シブパラメータは熟練技術者の知見に適合しており、レシピ設計業務の効率化に貢献できることが確認された。

4.1 緒言

バッチプロセスは、レシピに基づいて製造される。そして一般的にレシピは、ある前提条件に基づいて設計された製造条件を製造装置におけるコントローラの設定値として与えるパラメータ群として扱われている。このことが、同一レシピで製造しても品質や製造時間がばらつき、製造現場にて品質の作り込みが行われるという問題が発生している大きな要因になっていると考えている。

一方、反応を伴うプロセスの場合は、未反応原料を回収して、次の製造に使用するケースが多い。このようなケースでは回収原料の成分を分析し、次の製造で使用するフレッシュな原料と回収原料の仕込み比率を決めている。これは、製造環境に応じて元のレシピを変更している例である。見方を変えれば、回収原料の成分分析結果と回収原料の仕込み比率をモデルとして持った同一レシピであると言える。反応と未反応原料回収を有するプロセスで製造される製品例のようにレシピに「モデル」を内在させることにより不確定な要因に対して柔軟に対応できる可能性が高くなる。

そこで本章では、不確定な製造環境下でも柔軟に品質を維持できるようにするために、製造条件と製品品質との関係を表すモデルを内在させた Figure 4.1 に示すようなレシピの枠組みを提案するとともに、それを「モデル埋め込みレシピ」と定義し、その有効性を樹脂コンパウンド製品設計にて確認する。

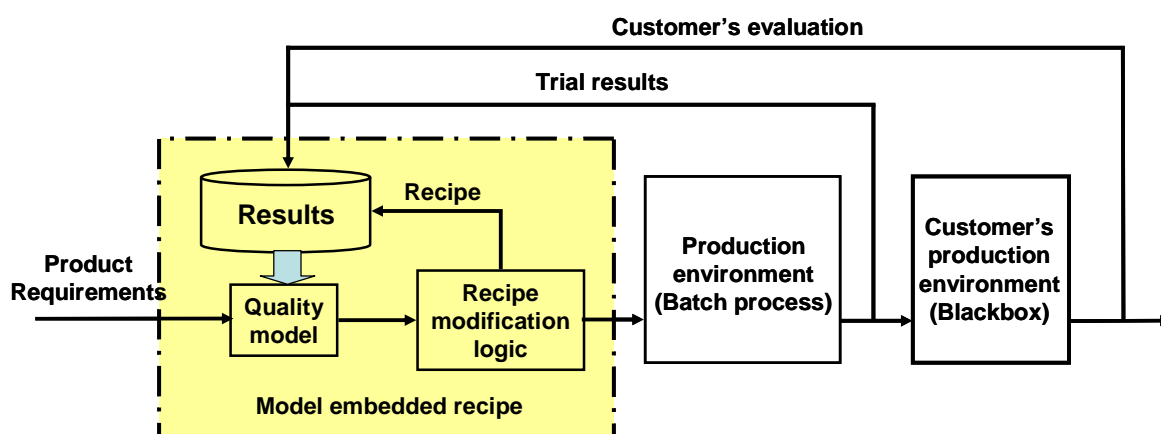


Figure 4.1 Model embedded recipe for recipe design

近年、消費者ニーズの多様化及び要求品質の高度化に伴い、自動車、家電、雑貨等に使用されるプラスチック部材を製造するベンダーは、部材に対して様々な色や特性を付加している。

それゆえ樹脂コンパウンド業界では、部材ベンダーが要求する色や特性を満足させるために、各種顔料や添加剤や樹脂を混合するレシピ設計（配合比率決定）と試作製造を日々実施している。しかし、顧客側での用途、使用条件、試作品評価に関する情報が樹脂コンパウンド製造者に十分に開示されないケースが多く、高い不確定性の下でレシピ設計に取り組みざるをえない。また、試作件数が多く、毎月100件を超える試作を実施している会社もある。それゆえレシピ設計に携わる技術者は、少ない情報の中で勘と経験を駆使して試行錯誤的なアプローチでレシピを作成しているのが現状である。

このような状況の中で、樹脂コンパウンド業界でも技術者の世代交代の時期にさしかかっており、熟練技術者が退職することによって市場の多様化に迅速に対応できなくなることが懸念されている。そこで、経験の少ない技術者が熟練者に相当する業務を担当できるようにするために、熟練者の知見を組織としての形式知に変換して技術を伝承することへのニーズが高まっている。しかし一般に、勘や経験を文書化することは困難であり、このことが製造業において技術伝承がなされない要因の一つとなっている。一方、樹脂コンパウンド製造会社には、過去の膨大な試作実績等の技術情報が蓄積されている。これまで、これらの技術情報が活用されることはあまりなかったが、そこには熟練者の知見が埋もれている可能性が高い。したがって、技術情報を解析することによって、レシピ設計に役立つ知見を抽出し、今後のレシピ設計に反映させることができれば、熟練者に頼らないシステムティックなレシピ設計業務を実現できると期待される。そこで本章では、過去の製造実績データを解析し、その解析結果を利用してモデル埋め込みレシピを構築し、レシピ設計に反映させることを試みる。

顧客による品質評価結果は顧客が使用する樹脂の特性や製造条件にも依存するが、これらの情報は開示されず、評価結果のみが伝えられるため、そのような不確定性の高い状況下でのレシピ設計を支援するため、顧客が着色した際の不良品の発生しやすさを意味する「不良率」という指標を定義する。これは確率ではなく、試作実績における試作数に対する不良発生数の割合を示すものである。そして過去の試作実績や製造実績に対して多変量解析を適用し、配合比率から不良率を予測するモデルを構築する。さらに、各成分の配合比率が不良率に与える影響度を算出するモデルを構築し、熟練技術者の知見を可視化する。この結果、不良率予測モデルに対して設計したレシピ情報を入力し、その出力である不良率が高かった場合に、不良率に対する影響度モデルを参照して不良率を低減させるようにレシピを修正することが可能になる。この作業を繰り返して、設計段階で不良品発生の確度を下げていくことにより、不確定要素による品質リスクを吸収する。

本章では、実際に企業が製造している樹脂着色剤のレシピ情報を用いて、不確定要素を考慮したモデル埋め込みレシピの有用性を検証する。

4.2 解決すべき課題

樹脂コンパウンド製造プロセスは、複数の原料を混合した後、押出機にて練り込み、ペレット化するバッチプロセスである。一般に樹脂コンパウンド業界では、自動車、家電、雑貨等に使用する部品を製造する樹脂部材メーカーが顧客となる。樹脂部材メーカーは樹脂コンパウンド製品を原料として、部材に様々な色や特性を付加している。樹脂コンパウンド製品は、ベース樹脂に顔料や添加剤を混合し高濃度に濃縮したものである。樹脂部材メーカーでは30倍、50倍等の希釈率で樹脂コンパウンド製品を部材に練り込ませて使用する。

樹脂コンパウンド業界におけるレシピ設計業務は一般に、

- ・品質に関しては、客先が加工した部材に色ムラや色スジが発生したかどうかという外観上の良否情報のみがフィードバックされるケースが多い、
- ・試作依頼件数が多く、1製品のレシピ設計に時間をかけることができない、

という特徴がある。また客先側使用樹脂の観点からは、

- ・各適用部品により使用樹脂の分子量分布や含有成分が異なる、
- ・同等グレード樹脂でもメーカーにより特性が異なる。
- ・樹脂メーカー統合により樹脂組成のブラックボックス化が進んでいる、

等の問題が、さらに客先側成型環境の観点からは、

- ・客先において能力の異なる成型機が混在している、
- ・客先成型品形状が多種多様である、

等の問題があり、顧客が使用する樹脂特性および成型機能力、部材形状の組み合わせにより樹脂コンパウンドとしての要求品質が多様化するとともに、顧客から詳細な情報を得られないのが現状である。一方、樹脂コンパウンドのレシピ設計業務では、熟練技術者の勘と経験による試行錯誤的なアプローチに依存するケースが多く、経験の違いにより設計所要時間に大きな差が出るのが現状である。

このような背景から樹脂コンパウンドメーカーでは、樹脂部材メーカーとのビジネスモデルを工夫していくとともに、前述した不確定要素を取り巻く環境下でも設計経験によらず顧客要求に対して迅速に対応できるように、熟練技術者が培った技術を組織として伝承できる仕組みを構築していく必要があると言える。

4.3 モデル埋め込みレシピの構築

一般に樹脂コンパウンド製造プロセスでは、顧客からの試作要求が多く、作成したレシピが大量に蓄積されているが、単に実績を残しているだけで新規レシピを作成する際のテンプレートにする以外は活用されていないのが現状である。本節では、技術伝承を実現していく第一ステップとして、熟練技術者が得た知見をレシピとして共有化するために、蓄積された大量の試作情報から樹脂コンパウンドのレシピと客先加工物の部材外観品質とを関連付ける統計モデル

を構築する．このモデルを利用することによって、試作経験の中で発生した客先の製造装置 / 使用原料の影響といった不確定要素を吸収することができれば、レシピの中に試作経験で得られた知見が伝承され、レシピ設計のリードタイムを短縮することが可能になると考えられる．そこで本章では、品質情報に物理的情報が含まれないということを踏まえ、説明変数間の相関を捉える主成分分析をベースとする試作経験を反映した統計モデルの構築手法およびそのモデルを活用したレシピ設計手法を提案する．

4.3.1 解析対象データの前処理

まず、使用する原料は単一成分ではなく複数成分から構成される混合物である場合が多いので、成分と品質との関係を解析できるように各原料を成分に展開して配合情報を成分組成情報に変換する．

品質データ $Y \in \mathbb{R}^{N \times Q}$ とレシピ変数のデータ $X \in \mathbb{R}^{N \times P}$ が蓄積されているとする．ここで N 、 Q 、 P はそれぞれ試作、品質変数、レシピ変数の数である．レシピ変数とは、原材料の種類や温度、圧力等運転条件として単位操作上設定すべき項目すなわちフォミュラとして管理する項目であり、前述した成分組成情報における成分の種類が含まれる．第 n 番目の試作における第 q 番目の品質変数および第 p 番目のレシピ変数を y_{nq} および x_{np} と表す．

つぎに、モデリングの前処理として、各変数の品質に対する影響を同じ土俵で評価するために、品質変数およびレシピ変数を平均 0、分散 1 に標準化する．

本章で扱う品質データは、良否結果という定性的情報とする．良品であれば 1、不良品であれば 0 と品質変数の値を定める．この定量化では、第 n 番目の試作における第 q 番目の品質変数 y_{nq} は次式で与えられる．

$$y_{nq} = 1, \quad q \text{ 番目の品質が規格を満たしている場合} \quad (4.1)$$

$$y_{nq} = 0, \quad q \text{ 番目の品質が規格を満たしていない場合} \quad (4.2)$$

つぎに、モデリングの前処理として、工学単位やレンジの異なる各変数の品質に対する影響を同じ尺度で評価するために、品質変数およびレシピ変数を平均 0、分散 1 に標準化する．以後、添え字の増加を防ぐため、標準化された品質変数、レシピ変数も y_{nq} および x_{np} で表す．

4.3.2 品質モデルの構築

レシピ変数間の相関が強い場合に発生する多重共線性の問題を回避するために、主成分回帰 (PCR; Principal Component Regression) を利用する．以下に、PCR に基づく変数変換の過程を示す．

レシピデータ行列 X の特異値分解は次式のように表される．

$$X = USV^T$$

$$= [U_R \ U_0] \begin{bmatrix} S_R & 0 \\ 0 & S_0 \end{bmatrix} [V_R \ V_0]^T \quad (4.3)$$

ここで、 $U \in \Re^{N \times N}$ 、 $V \in \Re^{P \times P}$ は直交行列、 $S \in \Re^{N \times P}$ は対角行列である． R は主成分分析（PCA; Principal Component Analysis）の結果採用する主成分の数であり、 $U_R \in \Re^{N \times R}$ 、 $V_R \in \Re^{P \times R}$ 、 $S_R \in \Re^{R \times R}$ は各行列のうち採用する主成分に対応する部分であり、 V_R をローディング行列と呼ぶ．なお、レシピデータ行列 X の特異値分解の結果として得られるローディング行列 V_R は、 X の共分散行列（標準化されていれば相関行列）の固有ベクトルのうち、 R 個の大きな固有値に対応する固有ベクトルを各列に持つ行列に等しい．主成分得点は、

$$T_R = XV_R = U_R S_R \quad (4.4)$$

で与えられる．この T_R を元の P 次元空間へ射影することによって、 X から重要性の低い非重要成分を除いた \hat{X} が構築できる．

$$\hat{X} = T_R V_R^T = X V_R V_R^T \quad (4.5)$$

PCRモデルは次式で与えられる．

$$Y = T_R K + E \quad (4.6)$$

E は誤差行列であり、回帰係数行列 K は、最小二乗法によって

$$K = (T_R^T T_R)^{-1} T_R^T Y \quad (4.7)$$

で求められる．また、品質の予測値 \hat{Y} は、

$$\hat{Y} = T_R K = X V_R K = X K_{\text{PCR}} \quad (4.8)$$

$$K_{\text{PCR}} \equiv V_R K \quad (4.9)$$

で与えられる．係数行列 K_{PCR} はレシピデータが品質に及ぼす影響を表す．

このようにPCRを適用すれば、品質モデルを構築できる．それゆえ、 K_{PCR} の第 q 列ベクトルを k_q とすれば、 y_q の予測値 \hat{y}_q は k_q とレシピデータ x より次式にて求めることができる．

$$\hat{y}_q = x^T k_q \quad (4.10)$$

この品質モデルは、すべての品質変数が定量的に与えられていることを前提としている．しかし、本章で対象とする品質情報は、樹脂を着色した際の色ムラや色スジの有無といった客先が定性的に評価した良否情報のみである．それゆえ、希望品質を定量的に指定することができない．そこで本章では、定性的な品質情報にレシピ（配合率）に対する不良率という物理的意味を与える定量化法（Kano ら^{1), 2)}; Nakagawa ら³⁾）を採用する．ある1つの品質に対する不良率を求める手順を以下に記す．以下の手順を全ての品質に対して繰り返すことにより、全ての品質に対する不良率が求められる．

第1ステップ：モデル構築に利用する全試作を良と不良の2クラスに分類する．

第2ステップ：レシピ変数間に強い相関関係がある場合にはオーバーフィッティングする恐れがあるので、PCAを利用して次元圧縮を行う．

第3ステップ：レシピデータを与えて品質を予測するために、 $R(P)$ 個の主成分が張る部分空間上でPCRを適用して、主成分得点と定量化した品質変数との関係を表す回帰式を求める．

この回帰式は、良／否のように2値化した目的変数の場合、主成分と良否との関係を示す軸となるので本章では良否判別軸と呼ぶ．

第4ステップ：求めた良否判別軸上に全試作を射影しヒストグラムを作成する．

第5ステップ：作成したヒストグラムのピン毎に全試作数に対する不良品の試作数を求めて、これを不良率とする．

Figure 4.2 に上述の良／不良クラスおよびそれを判別する軸のイメージを示す．

なお、多次元空間を描くことができないため、2次元平面上で判別軸を導出した状態を示している．

第 i 番目のピンを i 、そこでの良品と不良品の度数をそれぞれ $N_{\text{good}}(i)$ および $N_{\text{bad}}(i)$ とすると、不良率は次式で与えられる．

$$\text{bad}(\Delta_i) = \frac{N_{\text{bad}}(\Delta_i)}{N_{\text{good}}(\Delta_i) + N_{\text{bad}}(\Delta_i)} \quad (4.11)$$

このようにして不良率を計算するために、良・不良双方のクラスに対して同一のピンを利用する必要がある．この方法によってレシピと不良率を対応づけることが可能となり、その結果として、レシピ設計に関して定量的なアプローチが実行できるようになる．

Good and bad discriminant axis

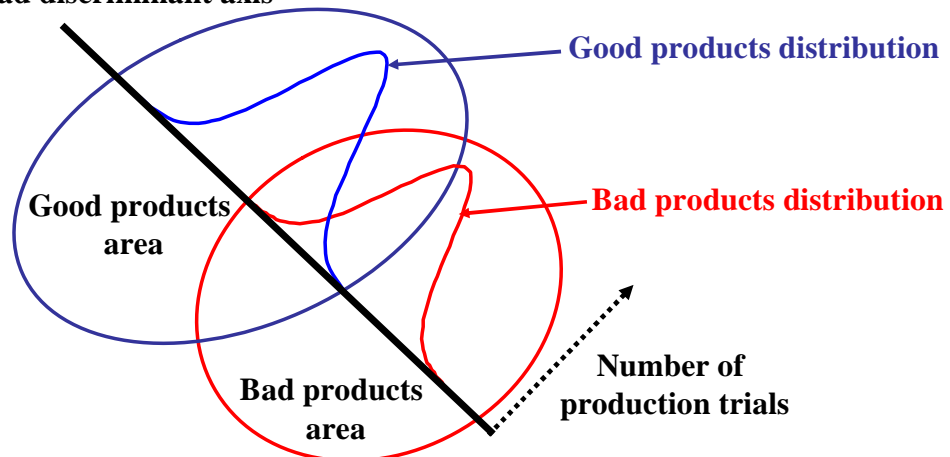


Fig. 4.2 Modeling image

最終的に、1回の試行でのレシピデータ x と不良率 $y_q^{[bad]}$ の関係は

$$y_q^* = x^T k_q \quad (4.12)$$

$$y_q^{[bad]} = f_q(y_q^*) \quad (4.13)$$

で与えられる．ここで、 y_q^* は Figure 4.2 における良否判別軸上の座標を、非線形関数 f_q は第 q 番目の品質に対して不良率を与える関数を表す．

4.3.3 各成分の品質に与える影響度算出

前項で不良率を予測するための品質モデル構築手法を述べたが、レシピ設計業務において、高い不良率が予測された場合は不良率が下がるようにレシピデータを修正しなければならない．レシピデータを修正するためには、各レシピ変数と品質との関係を把握する必要がある．

そこで本項では、任意のレシピパラメータが単位量増減した場合の不良率の増減を算出する手法について述べる．本章では、複数原料を混合して製造するコンパウンド製品を対象としており、レシピパラメータの中で製品を構成する成分の重量比率情報を入力対象とするため、任意の成分が単位量増減した場合の不良率の増減のことを成分の品質に与える影響度と呼ぶこととする．この影響度がわかれば、不良率を下げるためのレシピデータ改良がシステマティックに実施可能となる．

製品を構成する成分の重量比率情報は、どのレシピでも入力変数データの合計値が 100% となるような線形従属な入力情報であるため、本章では P C R を利用している．P C R など次元圧縮を伴う線形回帰手法を用いてモデルを構築する場合、入力変数間の相関関係はローディング行列によってモデル化される．つまり、入力変数データは入力変数が張る空間すべてに存在するのではなく、概ね採用する主成分の張る部分空間内に存在する．このように入力変数間に相関関係が存在する場合、各入力変数を独立に変化させることはできないので、着目する入力変数が単位量だけ変化したとき、主成分の張る部分空間上でその他の入力変数がどのように変化するかを求め、その変化の総合的な効果として出力変数がどれだけ変化するか、すなわち、成分の品質に与える影響度を算出する必要がある．しかし、着目する入力変数が単位量だけ変化すると決定しただけでは採用する主成分数引く 1 個の自由度が残る．

そこで本項では、独立成分分析 (I C A : Independent Component Analysis) を用いて、入力変数の相関関係を正確に捉えつつ自由度を減らす手法 (Kano ら⁴⁾) を採用する．以下にその方法を説明する．

I C A の目的は、複数の測定変数を統計的に独立な変数 (独立成分) の線形結合として表現することである．いま、測定変数 x_1, x_2, \dots, x_P が未知の独立成分 s_1, s_2, \dots, s_R の線形結合で与えられると仮定する．なお、独立成分は互いに統計的に独立であり、その平均は 0

とする．また、 $P = R$ とする．このとき、測定変数と独立成分の関係は以下のように表現される．

$$X = AS \quad (4.14)$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_P]^T \quad (4.15)$$

$$S = [s_1, s_2, \dots, s_R]^T \quad (4.16)$$

ここで $A \in \mathbb{R}^{P \times R}$ は未知のフルランク行列であり混合行列と呼ばれる．ICAとは、独立成分ベクトルおよび混合行列に関する知識を一切利用せずに、測定変数ベクトル x から混合行列 A と独立成分ベクトル s を推定する手法である (Jutten and Herault⁵⁾)．ただし、独立成分ベクトルおよび混合行列に関する情報が一切利用できないため、復元される成分の大きさと符号そして順序には任意性が残る．ICAは信号処理分野で開発された手法であるが、様々な分野で応用されており、例えばプロセスシステム工学分野では、近年、ICAを用いた異常検出・診断法に関する研究が精力的に行われている (Kano ら^{6), 7)})．

以下では、レシピデータ行列を測定変数のセットとして、独立成分分析により混合行列 A と R 個の成分から構成される独立成分ベクトル s が推定されているものとする．レシピ変数には、レシピ設計者がその値を操作できる変数が含まれる．それらの変数を入力変数と呼ぶことにする．任意の入力変数を単位量変化させた際に、その変数に影響する独立成分以外の成分の変化量を最小にすることを考える．

本研究で対象としている製品組成のように、任意の成分の含有率を増やすと増やした分だけ他の成分の含有率合計値が減少する．他の成分の含有率増減の組み合わせは無数に存在する．

影響度を評価する場合は対象とする成分以外の成分の含有率変化を極力抑える必要があり、無数に存在する含有率増減の組み合わせの中から総変化量の最小値を求めなくてはならない．

混合行列 A が既知の場合、独立成分ベクトルは混合行列 A の逆行列を用いることにより求めることが可能であるが、本ケースでは混合行列 A が未知であるので、次式のように、ICAを用いて求めた独立成分ベクトル s を入力変数ベクトル x と x を独立成分ベクトル s に復元する復元行列 W の積で表す．

$$s = Wx \quad (4.17)$$

ここで入力変数ベクトルの要素数は独立成分ベクトルの要素数以上であるため、 W の逆行列を求めることができない．そこで W の疑似逆行列を求めてそれを W^+ とすると、推定される混合行列 \hat{A} は $\hat{A} = W^+$ となる．また、その混合行列を以下のように表す．

$$\hat{A} = [\hat{a}_1 \cdots \hat{a}_p]^T \quad (4.18)$$

ここで、 \hat{a}_p^T は混合行列 \hat{A} の p 行である．

入力変数 x_p を単位量だけ変化させたときの独立成分ベクトルの変化量を Δs とする．無数に考えられるその他の変数の変化量の組み合わせの中で Δs の最小値を $\Delta \tilde{s}_{<p>}$ とした場合、変化方向

は正負両方あるので以下の2次計画問題を設定し解くこととする．

$$\Delta \tilde{s}_{<p>} = \arg \min_{\Delta s} \Delta s^T \Delta s \quad (4.19)$$

$$\text{s. t.} \quad \Delta x_p = \hat{a}_p^T \Delta s = 1 \quad (4.20)$$

この2次計画問題は x_p が単位量だけ変化したとき、 x_p に影響する独立成分以外はできるだけ変化させないことを意味する．この定式化によって入力変数の相関関係を正確に捉えつつ自由度を減らすことができる．入力変数全体の变化量 $\Delta x_{<p>}$ は、

$$\Delta x_{<p>} = \hat{A} \tilde{s}_{<p>} \quad (4.21)$$

と求まる．さらに、前項のPCRで求めた回帰係数を用いて x_p から y への影響度は、

$$\Delta y_{<p>} = k_p^T \Delta x_{<p>} \quad (4.22)$$

と求めることができる．

本手法で求めた製品を構成する成分の不良率への影響度は、レシピデータ改良における指針となる．すなわち、レシピデータを入力した結果として品質の不良率が高かった場合、不良率を下げるために

- ・ 影響度が正の大きな成分の含有率を増加させる
- ・ 影響度が負の大きな成分の含有率を減少させる

ようにレシピデータを改良すればよいことになる．

4.3.4 モデル埋め込みレシピによる不確定要素への対応

4.3.2 項で構築した品質モデルおよび 4.3.3 項で求めた成分の不良率への影響度は、過去の試作実績に基づいて導き出された情報であるため、過去に経験した不確定要素の情報を含んでいる．それゆえ顧客からある品質を要求された際に、レシピ変数を Eqs. (4.12)、(4.13) に入力することにより、経験の範囲で不良率を予測する．そして予測不良率が高い場合には、製品を構成する成分の中で不良率を下げることに寄与する成分含有率を調整することにより不良率を下げる事が可能になる．このようにモデルを利用して、経験を反映した改良レシピに更新できる機能を有したレシピを本章ではモデル埋め込みレシピと呼ぶこととする．このモデル埋め込みレシピを使用すれば、試作環境を取り巻く不確定要素にも柔軟に対応できる可能性が高くなると考えられる．本レシピの有効性を 4.4 節にて検証する．

4.4 樹脂着色剤製造プロセスへの適用

樹脂着色剤では従来、顧客から試作品の評価結果を取得してからレシピ設計にフィードバックしていたため、設計業務が非効率であるとともに顧客からの採用機会を逃すケースも少なくなかった。そこで本章では、モデル埋め込みレシピにより不良率を予測し、試作前にレシピ設計にフィードバックする手法を提案する。本節では、現実の樹脂着色剤のレシピ情報を用いて、本手法の有効性を検証した結果について述べる。

4.4.1 樹脂着色剤の品質モデリング

ある樹脂コンパウンド製造メーカーにおいて試作実績の多い、自動車向け部材を着色する着色剤を解析対象として選定した。樹脂着色剤は、様々な原料の混合物である。そして、その原料はまた様々な成分からなり、その組成も様々である。本研究では、各原料に含まれる「成分」が、最終製品の良、不良に影響すると考え、原料組成を元に展開した成分をレシピ変数とした。

一般に、着色する色や着色対象の樹脂の種類、顧客(部材メーカー)の使用装置により、顔料の拡散状況が変わるため、色はグレー色、着色対象の樹脂の種類をタルク含有樹脂、ある顧客向け製品に特定して、そのレシピおよびその実績を解析対象データとして抽出した。以下にデータの概要を記す。

- ・原料組成を基に展開した成分(レシピ変数)数: 66種類
- ・モデリング用試作レシピ: 381件(良品件数: 351件、不良品件数: 30件)
- ・品質データ: 客先での良否判定結果のみ(1種類)

以上のように、レシピ変数と試作数は多いが、客先での製造条件が開示されていないため、扱える情報がレシピ中の配合情報と客先での品質良否判定結果のみで、解析するにはとても貧弱な情報である。このため、製造現場ではこれまで情報の活用を諦めていた。しかし、このように貧弱な情報からでも有用な知見を引き出すことは可能である。

まず、レシピ変数66変数と品質良否判定結果を標準化した後、成分組成に対して主成分分析を実施した。その結果を Figure 4.3 に示す。この図より、有用な情報を含むと判断される分散1以上の主成分、すなわち相関行列の固有値が1以上である主成分21個を選択した。

つぎに、選択した主成分と定量化した品質情報に対してPCRを適用し、その回帰式を良否判別軸とした。そしてその軸上に全試作を射影し良、不良のヒストグラムを作成した。その結果を Figure 4.4 に示す。

製造条件と品質との関係が非線形な場合には、判別する軸が複数存在する可能性があるが、本章では製造条件と品質との関係が線形であるものと仮定して、判別する軸を1つ見つけて、モデルを作成した。また、本解析は購入原材料ではなくそれを構成する成分に対して実施しており、原材料間の関係までは解析できていないためコストを含めた最適な原材料の選定までは

本章のスコープには入っていない。

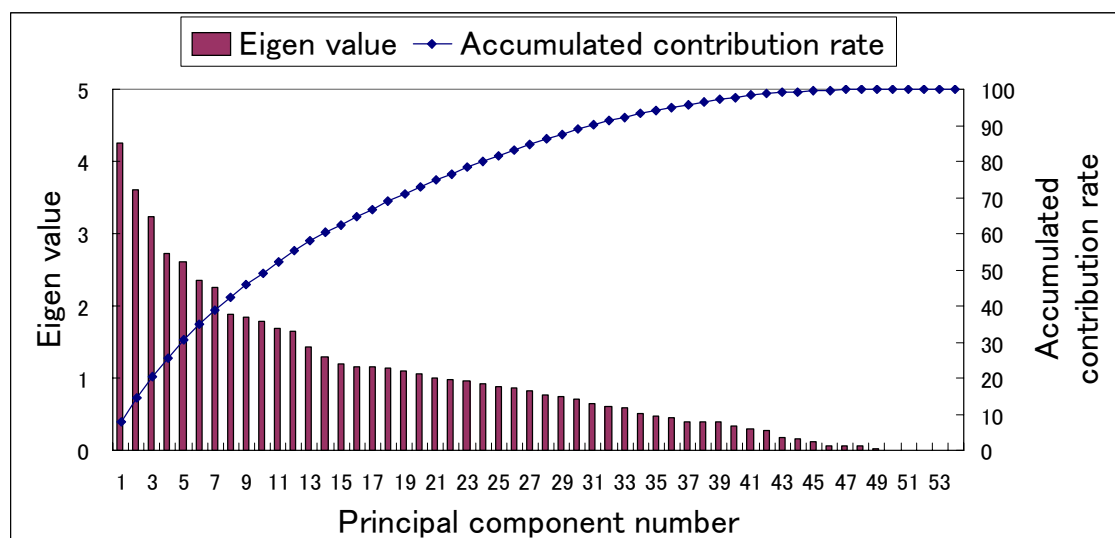


Fig.4.3 Result of PCA

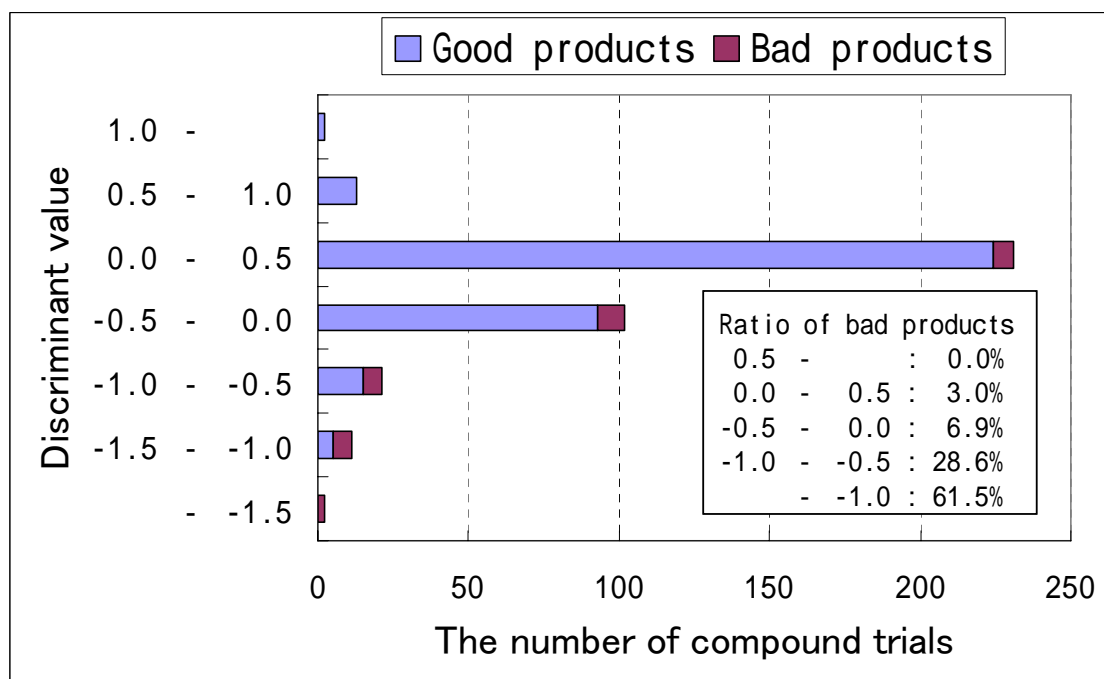


Fig. 4.4 Histogram of compound trial results: Modeling

Figure 4.4 から判別軸の正方向が良品となりやすい領域、負方向が不良品となりやすい領域になっていることがわかる．新規にレシピを作成した際に、そのレシピにおける判別値を算出して本モデルに照らし合わせることで、不良率を予測することができる．もし、算出した

判別値が不良率の高い領域に位置していた場合は、不良率を下げるようにレシピを改良する。

レシピの改良指針を決定するために、製品中成分の品質に対する影響度解析結果を利用する。本研究では66種類の製品中成分に対して独立成分分析を行って影響度を解析した。解析ソフトとして、国内外で開発が続けられているオープンソース方式のデータ解析・処理専用ソフトである「R (Windows 版 Version 2.8.1)」を使用した。

独立成分分析関数 fastICA を利用して、Eq. (4.17)における復元行列 W と Eq. (4.18)における推定混合行列 \hat{A} を求めた。さらに、2次計画問題ソルバーである ipop を利用して Eq. (4.19)における $\Delta \tilde{\gamma}_{<p>}$ を求めた。そして、Eqs. (4.12) と (4.22) を66変数分繰り返して各成分の影響度を算出した。

ここで顔料及び添加剤成分は、樹脂内での拡散という観点でうまく混ざり合うかどうか成分間の相性が存在する可能性はあるものの、特定の色および特性を実現するために選択の余地が無い場合が多いので、66成分の影響度を解析した後、その中から選択の自由度のある16種類の樹脂成分のみ抽出してレシピ改良指針となるグラフを作成した。

樹脂成分のみ抽出した品質への影響度解析結果を Figure 4.5 に示す。本図において影響度の正方向は良品化に寄与し、負方向は不良品化に寄与する。

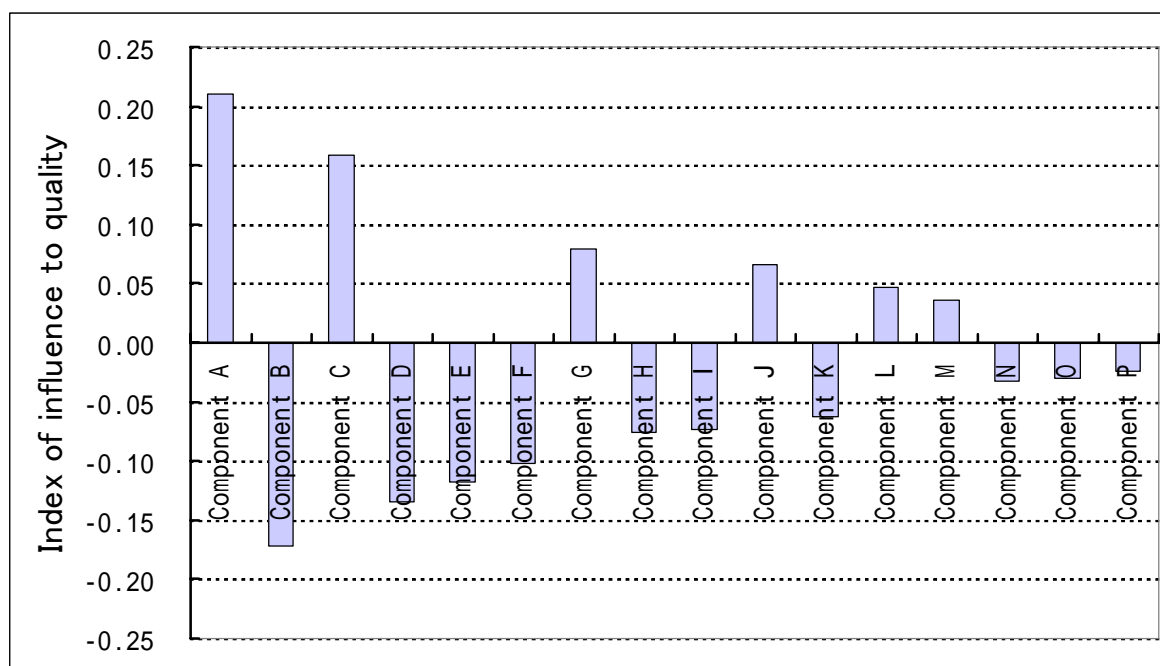


Fig. 4.5 Influence analysis

例えば Component C は、標準化(変数の平均値が0、分散が1になるように変換)された含有率が1.0 増えると良否判別軸上の判別値が正の方向に約0.16 増加する。すなわち、不良率が下がる方向であるので、レシピデータを改良する際は含有率を上げる必要がある。

逆に Component D は、標準化された含有率が 1.0 増えると良否判別軸上の判別値が負の方向に約 0.10 増加する．すなわち、不良率が上がる方向であるのでレシピデータを改良する際は、含有率を下げる必要がある．

成分 A 及び成分 G に関しては、レシピ設計者の長年の経験から不良品が発生しにくいものとして採用してきた原料にこれらの成分が含有されていることから、この結果は妥当である．成分 D に関しては、外観不良発生時に添加すると改善される可能性があるとして使用されてきたものの、その効果が低かった原料に含まれている．すなわち、改善に効果があると考えられていた原料は成分 D を含有していたことにより改善効果が低かった可能性が推察される．成分 H 及び成分 O に関しては、経験的に本成分を含有している原料を使用していると不良品が発生しやすいことが知られており、本成分を含有している原料を使用しないようにしてきたことから、この結果も妥当である．その他の成分に関しても、正負の関係は熟練技術者の知見と一致した．

以上の結果から、熟練技術者が漠然と感じていた原料の特徴がその中の成分の影響として表されていることがわかった．それゆえ、ICA に基づく影響度解析結果を不良率が高い場合のレシピ改良指針の決定に反映させることができることが明らかとなった．

4.4.2 レシピ設計業務のシステムティックアプローチ

構築したモデルを用いて、検証用試作レシピ 40 件(良品 33 件、不良品 7 件)を評価した．

まず、検証用レシピの判別値を算出し、良否判別軸および不良率に対する検証を実施した．検証用レシピの良否ヒストグラムを Figure 4.6 に示す．

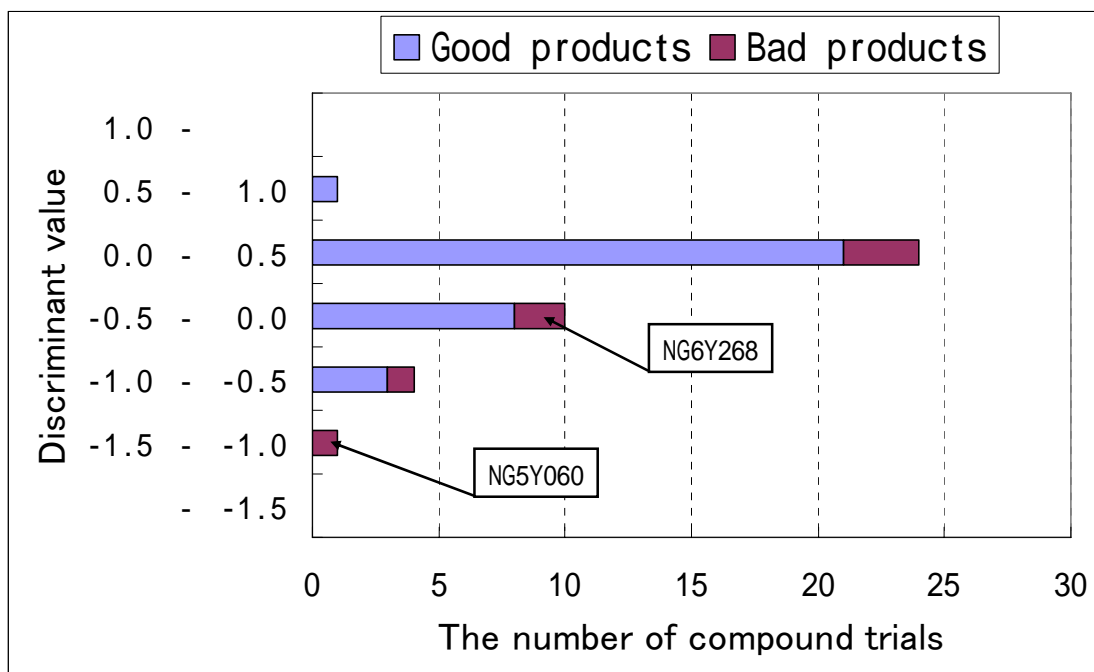


Fig. 4.6 Histogram of compound trial results: Verification

つぎに、不良レシピを改良して良品化した実績から成分の影響度モデルの有効性を検証した。その検証例を Table 4.1 および Table 4.2 に示す。

Case 1 は、提案した手法にて不良率が 28.6%と推定されたレシピコード「NG5Y060」のレシピに対して改良した例である。Table 4.1 からわかるように、改良したレシピコード「5Y244」のレシピでは、成分 C の含有率を増やし、成分 D 及び成分 I の含有率を減らしている。この変更は、Figure 4.5 の解析結果から見ても妥当である。この改良により新レシピの不良率の推定値は 3%に減少し、実際に製造した結果も良品であった。

Table 4.1 Result of verification: Case 1

Bad recipe code : NG5Y060				Good recipe code : 5Y244				
Component	Contribution	Content ratio %		Standardizaion value		Discrimination value		Improvement
		NG5Y060	5Y244	NG5Y060	5Y244	NG5Y060	5Y244	
A	0.210	0.000	0.000	-0.634	-0.634	-0.133	-0.133	0.000
B	-0.172	0.000	0.000	-0.339	-0.339	0.058	0.058	0.000
C	0.159	15.000	41.550	-0.689	0.617	-0.109	0.098	0.207
D	-0.134	10.000	0.000	8.505	-0.144	-1.142	0.019	1.162
E	-0.118	0.000	0.000	-0.287	-0.287	0.034	0.034	0.000
F	-0.102	0.000	0.000	-0.302	-0.302	0.031	0.031	0.000
G	0.079	0.000	0.000	-0.776	-0.776	-0.061	-0.061	0.000
H	-0.076	0.000	0.000	-0.560	-0.560	0.043	0.043	0.000
I	-0.074	32.064	15.514	2.614	0.942	-0.192	-0.069	0.123
J	0.067	0.000	0.000	-0.790	-0.790	-0.053	-0.053	0.000
K	-0.062	0.000	0.000	-0.309	-0.309	0.019	0.019	0.000
L	0.047	0.000	0.000	-0.116	-0.116	-0.005	-0.005	0.000
M	0.036	0.000	0.000	-0.134	-0.134	-0.005	-0.005	0.000
N	-0.032	0.000	0.000	-0.118	-0.118	0.004	0.004	0.000
O	-0.030	0.000	0.000	-0.460	-0.460	0.014	0.014	0.000
P	-0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Other		42.936	42.936			0.708	0.041	-0.667
Total		100.000	100.000			-0.791	0.034	0.825
				Bad ratio %		28.600	3.000	

Case 2 では、不良率の推定値が 6.9%であったレシピコード「NG6Y268」のレシピに対して、成分 C の含有率を増やし、成分 B の含有率を減らすように改良した結果である。この改良レシピ（レシピコード「8Y089」）では不良率の推定値は 3%に移行し、実際に製造した結果も良品であった。本ケースでは成分 I のように不良率を高くする成分の含有率が増えている。また、成分 A 及び成分 G のように不良率を低下させる成分の含有率が減っている。しかしながら、不良率低減効果の高い成分 C の含有率が大幅に増えていることから、不良率の推定値は下がっている。複数成分が混在する混合物を原料として使用しているため、この例のように製品中の成分含有率を任意に変更できず、不良率を増加させる成分の含有率が増える場合もある。

Table 4.2 Result of verification: Case 2

Bad recipe code : NG6Y268 Good recipe code : 8Y089

Component	Contribution	Content ratio		Standardizaion value		Discrimination value		Improvement
		NG6Y268	8Y089	NG6Y268	8Y089	NG6Y268	8Y089	
A	0.210	1.823	0.365	-0.364	-0.580	-0.077	-0.122	-0.045
B	-0.172	7.819	0.000	2.089	-0.339	-0.358	0.058	0.417
C	0.159	23.830	50.500	-0.255	1.057	-0.040	0.168	0.208
D	-0.134	0.000	0.000	-0.144	-0.144	0.019	0.019	0.000
E	-0.118	0.000	0.000	-0.287	-0.287	0.034	0.034	0.000
F	-0.102	0.000	0.000	-0.302	-0.302	0.031	0.031	0.000
G	0.079	14.880	3.896	1.399	-0.207	0.110	-0.016	-0.126
H	-0.076	0.000	0.000	-0.560	-0.560	0.043	0.043	0.000
I	-0.074	7.230	19.051	0.105	1.300	-0.008	-0.096	-0.088
J	0.067	0.000	0.000	-0.790	-0.790	-0.053	-0.053	0.000
K	-0.062	9.000	0.597	0.484	-0.257	-0.030	0.016	0.046
L	0.047	0.000	0.000	-0.116	-0.116	-0.005	-0.005	0.000
M	0.036	0.000	0.000	-0.134	-0.134	-0.005	-0.005	0.000
N	-0.032	0.000	0.000	-0.118	-0.118	0.004	0.004	0.000
O	-0.030	2.233	1.792	-0.227	-0.273	0.007	0.008	0.001
P	-0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Other		33.185	23.798			-0.100	0.250	0.349
Total		100.000	100.000			-0.429	0.333	0.762
				Bad ratio %		6.900	3.000	

以上2ケースのレシピ改善結果を Table 4.3 に示す。

これまでは、経験により「原料」ベースで不良率の低減が図られてきた。しかしながら、本章で示すように「成分」ベースで解析することにより、不良率を低減するためにはどのような原料を用いるべきか、見通し良く検討できる。

Table 4.3 Improvement of recipe

Recipe code	Before improving		After improving	
	Discrimination value	Bad ratio %	Discrimination value	Bad ratio %
NG5Y060	-0.791	28.6	0.034	3.0
NG6Y268	-0.429	6.9	0.333	3.0

以上の結果より、不確定要素の多い樹脂着色剤のレシピ設計においても実績データを多変量解析して品質モデルを構築することによりシステムティックなアプローチが可能となることが検証できた。またこれは、文書化が難しい試作経験から得られた知見をモデルとしてレシピに反映させることが可能になることを意味しており、知見の伝承という観点において有効な手法になると考えられる。

4.5 結言

製品のライフサイクルが短くなってきているだけでなく、顧客ごとに個別の品質を要求される割合が高くなり、多種多様な製品を迅速に供給していくことが求められる時代になってきている。このような背景の中、レシピ中の各種パラメータ設定業務に関してはモデルが存在していなかったために、現状業務の問題点が指摘されてきたにも関わらずシステムティックに取り組まれていなかった。

また、製品毎にあらかじめ製造条件（パラメータ）を定めた従来の固定的レシピ群は、要求品質空間上での離散点での品質を保証するレシピと言える。それゆえ、少なくとも要求品質の数だけは、あらかじめレシピデータを準備しておく必要があるだけでなく、原料の品質や外気温、湿度といった製造環境の変動および客先での製造条件が変動する都度、レシピを設計し直さなければならないケースが多くなる。すなわち、従来の固定的レシピでは、多様な品質要求に対して十分に対応できない。

そこで本章では、製造条件と製品品質との関係を表すモデルをレシピの中に内在させるモデル埋め込みレシピを提案した。そして、樹脂コンパウンド製品を対象にその有効性を検証した。

蓄積されたレシピ中の配合データに着目し、各原料をできる限り成分に分解して配合データを製品組成データに変換するとともに不良率という指標を定義し、不良率と製品組成との関係をモデル化することを試みた。さらに、製品組成と品質良否結果の情報に対して独立成分分析を利用して品質良否に対して影響を与える成分とその影響度を解析し、不良率を低減する指針を提示できるようにした。

本検証の結果、新たな要求に対するレシピ設計を実施する際にモデル埋め込みレシピを利用することにより、これまでの実績の範囲ではあるが、設計段階で客先での品質評価結果を予測することが可能になり、設計業務が効率化されることがわかった。このことにより、勘と経験に依存しないシステムティックなレシピ設計業務の実現化に一步近づけたと言える。

今後さらに、不確定要素に対応すべく品質モデルとレシピを融合させていくという観点で、モデル埋め込みレシピの構造を確立していくことが望まれる。

Nomenclature

\hat{a}	=	column vector of \hat{A}	[-]
A	=	mixed matrix	[-]
\hat{A}	=	predictive mixed matrix	[-]
i	=	bin number i	[-]
E	=	error matrix	[-]
k_{PCR}	=	regression coefficient vector corresponding to y_q	[-]
K	=	regression coefficient matrix	[-]
K_{PCR}	=	regression coefficient matrix for predictive quality equation	[-]
n	=	compound trial number	[-]
N_{good}	=	the number of products evaluated good	[-]
N_{bad}	=	the number of products evaluated bad	[-]
p	=	recipe parameter number	[-]
P	=	the number of recipe parameters	[-]
q	=	product quality parameter number	[-]
Q	=	the number of product quality parameters	[-]
s	=	independent component vector	[-]
s^*	=	independent component vector when x_p changes	[-]
$\tilde{s}_{<p>}$	=	variation vector when x_p changes	[-]
S	=	diagonal matrix	[-]
S_R	=	diagonal matrix corresponding to the number of principal components to adopt	[-]
S_0	=	diagonal zero matrix	[-]
T	=	principal component score vector	[-]
T_R	=	principal component score vector corresponding to the number of principal components to adopt	[-]
U	=	orthogonal matrix	[-]
U_R	=	orthogonal matrix corresponding to the number of principal components to adopt	[-]
U_0	=	orthogonal zero matrix	[-]
V	=	loading matrix	[-]

V_R	=	loading matrix corresponding to the number of principal components to adopt	[-]
V_0	=	loading zero matrix	[-]
W	=	inverse matrix of A	[-]
W^+	=	pseudo inverse matrix of W	[-]
x	=	column vector of X	[-]
x_p	=	the p th input variable	[-]
$\Delta x_{<p>}$	=	changes in the overall amount of input variables	[-]
X	=	recipe data matrix	[-]
\hat{X}	=	recipe data matrix eliminated noise	[-]
y	=	column vector of Y	[-]
y_q	=	the q th product quality variable	[-]
y_q^*	=	discriminant value	[-]
$\Delta y_{<p>}$	=	index of influence to quality of x_p	[-]
Y	=	product quality data matrix	[-]
\hat{Y}	=	predictive product quality data matrix	[-]

参考文献

- 1) Kano, M., K. Fujiwara, S. Hasebe and H. Ohno; "Data-Driven Approach for Product Quality/Yield Improvement : How to Specify Target of Qualitative Quality Variables", SICE Journal of Control, Measurement and System Integration, Vol.42, No.8, pp.902 - 908 (2006)
- 2) Kano, M. and Y. Nakagawa; "Data-Based Process Monitoring, Process Control and Quality Improvement : Recent Developments and Applications in Steel Industry", *Comput. Chem. Eng.*, 32, 12 - 24 (2008)
- 3) Nakagawa, Y., M. Kano, S. Nakagawa and T. Tanizaki; "Quality Improvement of Steel Products through Statistical Approach", *J.SOPE Japan*, 19, 220 - 227(2008)

- 4) Kano, M., Y. Mukai and S. Hasebe; "How to Estimate True Effect of Changing Operating Condition on Product Quality: ICA-Based Approach", 19th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE19), 1015 - 1019, Cracow, Poland, June 14 - 17 (2009)
- 5) Jutten, C. and J. Herault; "Blind Separation of Sources, Part I: An Adaptive Algorithm Based on Neuromimetic Architecture", *Signal Processing*, 24, 1 - 10 (1991).
- 6) Kano, M., S. Tanaka, S. Hasebe, I. Hashimoto and H. Ohno; "Monitoring Independent Components for Fault Detection", *AIChE J.*, 49, 969 - 976 (2003)
- 7) Kano, M., S. Hasebe, I. Hashimoto and H. Ohno; "Evolution of Multivariate Statistical Process Control: Application of Independent Component Analysis and External Analysis", *Comput. Chem. Eng.*, 28, 1157 - 1166 (2004)

第5章

レシピ設計業務における

シミュレーションベースドマネジメント

近年国内のバッチプロセスでは、製品設計から受注して顧客固有の高付加価値機能商品を製造する比率が高くなってきており、迅速にレシピを作り込む技術力が要求されている。しかし、工業化リードタイムの短縮やレシピの信頼性向上という課題に対して、レシピ設計業務は属人的な要素が高く、組織としてシステムティックに取り組まれているとは評価できないのが現状である。また、レシピ開発においては、原料の変動など様々な不確定要素を抑え込み、品質を確保できるように作り込むことが求められるが、現状のレシピは、製品を製造できるある一通りのフォミュラとしての数値になっているケースが多く、状況が異なると異なるレシピとして蓄積している。そのため、レシピ通りに操業しても想定の状態からずれることが発生し、その場合には、熟練運転員が手動で調整することにより品質を作り込んでいる。これが、運転員のスキルとして評価されているわけだが、レシピに反映されておらず、組織としての力にもなっていない。レシピ通りではうまくいかない場合の情報は、レシピとして蓄積されるべきであり、その情報と品質等の関係をモデル化できれば、汎用的で状況に応じて適応できるレシピとなることが期待できる。

これがモデル埋め込みレシピの概念であるが、この構築を推進するためには、求められる品質を実現する一つの運転条件を求めるというだけではなく、変動時の情報の蓄積が求められる。この蓄積は製造現場だけで保有するのではなく、開発部門に戻すことにより、その対象の商品だけでなく、将来開発される商品にも反映できると期待される。この部門を越えた取り組みが、開発から市場化までのリードタイムの短縮やレシピの信頼性向上に不可欠であると考えられる。

この部門を越えた取り組みをマネジメントし、レシピ開発業務をシステムティックに推進するためには、開発業務をモデル化して各部門の現状を可視化し、課題を共通認識できるツールが求められる。

レシピ開発を開発プロジェクトとしてとらえると、プロジェクトマネジメントのためには、マイクロソフト社の MS Project など、汎用的なプロジェクト管理ツールが市販されている。多数の業務を洗い出し、その前後関係を整理し、進捗管理するというツールは、建設作業など各業務の流れが確定的でやり直しのない大規模プロジェクトには有効であるが、レシピ開発プロジェクトでは、品質の作り込みが重要課題であり、試行錯誤や見直しの発生が不可避であり、

ウォーターフォール型の開発にならないので、上述したプロジェクトマネジメントツールが、モデル埋め込みレシピの開発という目的には有効でない。

製品開発業務のプロセスモデルとして、サプライチェーン・カウンシルからDCOR (Design Chain Operations Reference model)¹⁾が提案されている。これは、新規製品に対してこれまでの延長上のものと、設計の見直しが必要な部分、研究開発が必要な部分と、新規性を整理したうえで、自社で開発するか、他社から購入する、あるいは、開発を依頼するか、という観点で、自社複数部門あるいは複数の会社にわたる開発プロジェクトを、サプライチェーンと同様にチェーンとして整理し管理しようというものである。不確定性を抑え込み、信頼性の高いレシピを迅速に開発するためには、複数部門、顧客、原料調達先など複数の組織の協力が必要であるという観点はレシピ開発業務と共通するが、開発能力の向上を検討するモデルとはなっていない。

そこで本章では、品質の作り込みというフィードバックによる経験やノウハウの蓄積がキーになる開発業務において、レシピの信頼性の向上、組織の開発能力の向上をマネジメントするツールを新たに提案する。

開発対象であるレシピは、国際規格 ANSI/ISA-S88.01²⁾ (以後、S88 と呼ぶ)において、その取り扱うべき情報が定義されている。S88 は、すべて手動で行うバッチ操作から全自動運転ができるプラントまで、すべての対象に適用できるようにレシピ情報を整理したものである。そのため、レシピ設計業務の課題は、S88 に示される情報を決定していくこととも表現できるので、S88 を基にレシピ開発業務をアクティビティ・モデリング手法である IDEF0 (Integration DEFinition for Function Model) で表現した。S88 がすべてのレシピに対して汎用的であるように、この IDEF0 モデルもすべてのレシピ開発モデルに汎用的であると考えられる。この IDEF0 モデルは、課題の解決を業務として表現しているため、基礎研究から順に取り組むプロジェクト、製造現場での試作だけを行うプロジェクトも、一部の課題が解決済みであるとか、各業務が同時並行に進むなど、 IDEF0 モデルでの各業務の初期状態と業務の取り進め方のバリエーションで様々なプロジェクトを表現できる。

このモデルで検討する重要な指標として、レシピ開発における不確定性の度合いを表現する確信度という指標を提案した。複数部門が連携したレシピ開発業務における能力向上が、このモデルの目的であるので、開発能力を高めるための検討要素を各業務に対してリストアップし、各業務の取り組みにおいて存在しうる不確定要素の抑え込みが、どのように期待できるかをモデルで表現する。それぞれの業務担当者が、各自の認識を数値化するもので、数値の主観性は不可避であるが、部門を越えた検討を行うのに、各自の認識を「可視化」し、課題を共通認識するために必要な指標であると考えられる。

確信度のモデル表現としては、各業務において、自分の努力で時間をかければ向上することが期待できる部分と、どうしても他業務からの情報に依存する部分があると考えて、入力依存性というパラメータを用意した。たとえば、試作の担当者は指定されたレシピ通りに確実

に製造する能力を持っていたとしても、そのレシピが不適切なものであれば試作結果は不適切になってしまう。この場合、入力依存度が高い業務として表現することになる。もし、試作担当者が与えられたレシピの不備に対して、レシピの変更を要求せずに試作品を作り込むとすると、入力レシピの確信度が低くても出力の確信度を高くできることになるので、その場合は、入力依存度が低いと表現することになる。また、新製品開発に取り組むときに、参考になる情報が豊富な場合でも、情報が貧弱なためR & Dから実施しなければならない場合でもモデルは共通であり、各業務の初期状態の違いによって表現する。下流の業務であっても、必要な入力が入手可能状態であれば、上流の業務の終了を待たずに開始できる。確信度が高くなるまで、上流の業務で作り込んでから下流の業務に移行するか、確信度が低くても、まずトライするかというような戦略の違いも、モデルのパラメータとして表現する。

開発業務に関わるメンバーが、現状を業務モデルのパラメータとして表現し、さらに、開発能力を向上させるための戦略もパラメータで表現することで、取り組むべき課題を洗い出し、戦略の有効性を共通に認識できることになり、開発業務間の連携が強化され組織としての知識の共有化および財産化にもつながるものと期待できる。

5.1 緒言

付加価値の高い機能化学品の多くは、多品種変量生産に適しているバッチプロセスにて製造されている。近年は、製品のライフサイクルが短くなってきているだけでなく、顧客から個別に品質の指定を受けて製品設計や装置開発から実施する割合が高くなってきている。製品設計の核となるレシピ設計業務は、開発担当者の能力に依存するケースが多いだけでなく、設計されるレシピ自体、うまく製造できる一通りの運転条件がフォミュラとして数値で表現されているだけで、原料特性や装置の汚れといった製造環境の変動と製品品質の関係はレシピに表現されていない。製造環境の変動に対する製品品質の確保対応は、製造現場の運転員に依存しているのが現状である。それゆえ品質の作り込みは、レシピの質の改善という形ではなく、製造現場の運転員のスキル向上という形で実現され、組織としての知的資産となっていない。

市場化までのスピードアップの重要性は、各企業で認識され、プロジェクト管理システムの導入や、プロジェクトの推進体制であるマトリクス型組織への組織改革を導入して、高い専門性と幅広い技術を管理し、多種多様な顧客要求品質を実現することを目指している。しかし、プロジェクト管理システムは、建設プロジェクトなど事業の流れがC P MやP E R Tで計画管理できるようなプロジェクトを対象としており、開発業務のような不確定性が高く、試行錯誤、やり直しが存在する業務には不適切である。マトリクス構造においても、その業務でのプロジェクトの経験による各業務組織の能力向上や経験の蓄積が期待できても、他の業務との情報共有や連携による組織力向上の観点でのマネジメントにはなっておらず、開発業務が依然として熟練者の勘と経験に依存した属人的な業務となっている企業が多い。

開発業務をシステム化するためには、レシピにおいても、ある前提での運転条件を記述し、製造環境の変動には製造現場での作り込みに期待するというものから、変動の情報をフィードバックすることにより変動に対する対応もレシピにモデルとして取り込み、運転情報をもとにレシピ自体の質が向上するという構造をレシピに持たせ、またそのようなレシピの構築を推進するための開発体制の構築を検討することが重要である。

そこで本章では、業務を越えた変動情報等のフィードバックを明記したうえで、レシピ開発業務を表現し、現状を解析し、今後の戦略を検討するために利用できるモデルを提案する。

ここでは、組織の力、業務の成果に対して、確信度という評価指標を新たに提案するが、確信度が高いということは、レシピ設計の各業務が根拠のある情報および手法に基づいて実施されているという意味であり、不確定な部分が少ないことを示す。ただし、確信度が低いからといって、そのレシピが利用できないとは限らない。レシピ開発では、その根拠がしっかりしていなくても、たまたま製品製造に成功するケースがある。しかし、品質生成のメカニズムが十分に把握されていない状況では、つぎのレシピ開発でも成功する確率が高いとは考えられない。業務の確信度を高めるためには、対象業務にて確信度の高い情報を入手し、製造に関するノウハウを蓄積していくことが必要である。

本章で対象としているのは、組織としての製品を市場化する能力の向上であり、ある一つの製品の市場化までを早くするという問題ではない。バッチプラントは汎用性の高さが評価されるものであり、複数の製品群の製造が想定され、新製品の開発が継続的に行われると考えられる。確信度は、新たな製品群の開発に対する組織力を表現するための指標であり、各業務で得られる知見や技術を組織として蓄積し、共有し、レシピを向上し続けるという体制を推進するうえで、有効な戦略を検討するときの指標となる。

開発業務をIDEF0モデルで整理し、確信度という指標に基づきシステムティックに複数業務にわたる連携を検討する手法を確立することは、多様化した市場に柔軟に対応できるように組織力を向上させるという観点で非常に意義のあることと考えられる。

5.2 現状の問題点

5.2.1 製造部門における問題点

たとえば、色材やトナーの製造部門では、同一原料ベンダーが製造した原料でも、ロットの違いにより原料品質の変動があるため、納入する前に対象ロットの原料サンプルを入手して試作し、使用可能かどうかを評価した上で納入している。この例のようにバッチプロセスでは、原料中の不純物や原料特性が製品品質に与える影響といった不確定要素を含んだ状態のまま営業生産している場合が多い。製品設計段階で製品品質に関するコントロール因子すべてを洗い出すのは困難であり、その結果原料やプロセス流体の組成変動、槽内混合状態の不均一性や設備の経年変化、計測制御性能等様々な外乱の影響を受けやすくなっていると考えられる。

それゆえ、マスターレシピ通りに製造しても製品パフォーマンスの再現性が得られず、製造現場にて苦勞しながら品質の作り込みを実施しているケースが多い。その作り込みは、大半は運転員のノウハウとして蓄積されるか、状況毎に異なるマスターレシピとして蓄積されることになる。状況変化に応じた対応ができるモデルあるいは関係式が取り込まれたモデル埋め込みレシピが望まれるのであるが、製造側固有レシピのバリエーションの増加となるか、運転員個人の経験知として残ることになり、組織としての知的財産にはならない状態であり、研究開発部門にフィードバックされることも少ない。

5.2.2 開発部門における問題点

開発部門では、過去に実施した類似実験 / 試作や失敗経験で得られた豊富な知見に基づいて、効率的にレシピを設計するケースが多く、熟練者と経験の浅い担当者とは設計所要時間に大きな差が出てくる。また、実験内容や根拠が組織ではなく個人ベースで残っているケースが多いので、重複実験を誘発する環境になっていると言える。レシピ設計を実施する場合、マネジメントが不十分であると以下の状況が発生しやすい。

- ・ 要求品質の実現に成功した結果だけを残し、失敗した結果を残さない
- ・ 品質生成メカニズムの把握まで踏み込まずにレシピ設計業務を完了させてしまう
- ・ 要求品質を実現していく上でパワーを掛けても効果の低い業務に注力してしまう
- ・ ボトルネックの業務をおろそかにしてしまう

5.2.3 レシピ設計業務のモデル化の必要性

レシピという観点で現状の問題点をとらえると、製造部門と研究開発部門の両者がレシピに内在する不確定要素を相互認識せずに運用していることが大きく起因していると考えられる。すなわち、対象レシピがどのような根拠に基づいて設計されたものか、そして設計上把握すべき項目の中で不確定情報は何かということが「可視化」されていないということである。もし「可視化」されれば、製造部門でも確定情報と不確定情報が明確になるとともに、両部門が協力して不確定情報を削減していく、すなわち組織による品質の作り込みが可能となる。そこで次項にて「可視化」する環境を構築するために、レシピ設計業務をモデル化する。

5.3 レシピ設計業務のモデル化

5.3.1 モデル化の前提

本章では、ある特定の顧客から特定の品質を満足する製品の供給要求を受けて、新製品のレシピを設計し工業化する業務を対象とする。試作および製造設備に関しては、現在保有している設備を使用することを前提とし、必要があれば装置の改造や増強を実施するものとする。また、合成ルートや触媒探索等の研究は本稿のスコープ外とする。

モデル表記手法としては、I D E F 0を採用した。このI D E F 0は動詞句で表現されるア

クティビティ(Activity)に対して、上から入力される制約条件及び指示(Control)に基づき、左から検討に必要な情報(Input)を入力し、下から検討に必要なツールもしくはシステム(Mechanism)が与えられ、右へ検討結果(Output)を出力する。この表記方法によりアクティビティが何のために、どのような手段で何をどう処理するかを明快に表現できることになる。すなわちIDEF0では、各アクティビティに入力される情報がどのように得られたものかその入手ルートが残るので、単に業務を実施した結果だけでなく、どのような情報に基づいて検討したかという根拠が残るようになる。そしてIDEF0の特徴は、与えられたジョブに対して何を決めなくてはならないのかという課題解決指向でモデルを構築する点にあり、本章のテーマであるレシピ設計のような課題解決業務をモデル化するのに適していると考えられる。

業務をモデル化するにあたり、レシピオリエンテッドなバッチコントロールに関する国際規格であるS88に則ってレシピ情報を決定する。これは、基本的に規格化されているレシピ情報を決定することにより必然的にバッチプロセスでの製造が可能となると考えられるからである。

S88において、製造に適用するレシピは設備を意識したマスターレシピであり、「ヘッダー」、「フォミュラ」、「設備要件」、「レシピプロシジャ」、「その他の情報」の5つのカテゴリの情報が構成されている。

次項にてこれらの情報を決定する業務プロセスモデルを提案する。

5.3.2 IDEF0を用いた業務プロセスモデル

IDEF0では、前項にて述べたようにアクティビティを表すボックスに対して上からControl、左からInput、下からMechanism、右へOutputを記述するルールになっている。しかし、全ての情報を記述すると、アクティビティ間を結ぶ線が多く錯綜してとても複雑な図になってしまうということ、それから、本研究での目的が業務取り進めに関するシミュレーションであるということから、本章ではアクティビティとそれを結ぶInputおよびOutputの線のみを記した簡易的なモデル図にて表現することとする。

Figure 5.1 に本章で対象とする「A0:新製品を市場化する」アクティビティを展開した図を示す。これは、顧客要求品質を満足する試作結果を得るマスターレシピが得られ、ある程度の変動のもので、品質が確保できる管理情報が得られた時点で市場化が完結するとして、R&D後の開発のアクティビティを整理している。「A2:マスターレシピを設計する」の前工程として、原料選定や反応条件、物質/熱収支等レシピのベースとなる情報を出力する「A1:ゼネラルレシピを設計する」を、設定し、さらに、後工程としてマスターレシピの開発だけでは抑えきれない変動に対する柔軟性や必要な対応の検討を行う「A3:フィージビリティを探索する」を設計実務サブアクティビティとして設定している。マスターレシピができれば、製造を開始できると考えられるのだが、品質管理の点でもレシピの確信度の向上に対しても、単に1つの運転条件を求めるのではなく、変動を考慮したアクティビティを設定している。これは、不確定性を考慮したモデル埋め込みレシピの開発には不可欠なアクティビティである。ここでは、市場

化までの期間を評価するため、フィージビリティを探索するというアクティビティ表現になっているが、市場化後も変動に対する情報をフィードバックし、レシピの向上と開発力の向上を目指す活動が望まれる。

「A1:ゼネラルレシピを設計する」および「A2:マスターレシピを設計する」アクティビティには、レシピ開発で決定すべき課題の解決業務が展開されている。レシピの必要要件は S88 で整理されており、原料、装置、操作のうち、「A1:ゼネラルレシピを設計する」は、使用原料の決定に重点を置いたアクティビティであり、ベンチプラントでの試作までを示す。「A2:マスターレシピを設計する」は、装置選択と操作手順およびその条件の決定に重点を置いたアクティビティであり、実操業プラントでの作り込みと評価までを示す。この I D E F 0 モデルは、レシピ開発における課題を中心に、課題の解決業務を表現しているので、現状に対しても、改善後の姿に対しても適用可能なものである。業務改革を検討するためのアクティビティモデルでは、As Is Model と To Be Model を構築して、モデル表現でその違いを表現するが、ここで示す I D E F 0 モデルは、レシピ開発の課題解決モデルであり、As Is も To Be もモデル表現としては共通であり、実行する業務の初期状態や実行順序、実施タイミングとして、その差異が表現されることになる。

「A1:ゼネラルレシピを設計する」をさらに展開した結果を Figure 5.2 に示す。「A11:原料/溶媒や反応系を選定する」と「A12:実験試作プラントで試作品を製造する」を実行業務のサブアクティビティとして定義し、審査業務のサブアクティビティとして「A13:ゼネラルレシピを評価する」を定義した。

「A2:マスターレシピを設計する」をさらに展開した結果を Figure 5.3 に示す。ここでは、「A21:プロシジャおよび実プラントを設計する」、「A22:実装置にて試作品を製造する」を実行業務のサブアクティビティとして定義し、審査業務のサブアクティビティを「A23:マスターレシピを評価する」と定義した。

「A3:フィージビリティを探索する」をさらに展開した結果を Figure 5.4 に示す。ここでは、「A31:製造条件における変動可能範囲を検討する」を実行業務のサブアクティビティとして定義し、審査業務のサブアクティビティを「A32:製造条件における変動可能範囲に関する社内審査を行う」と定義した。

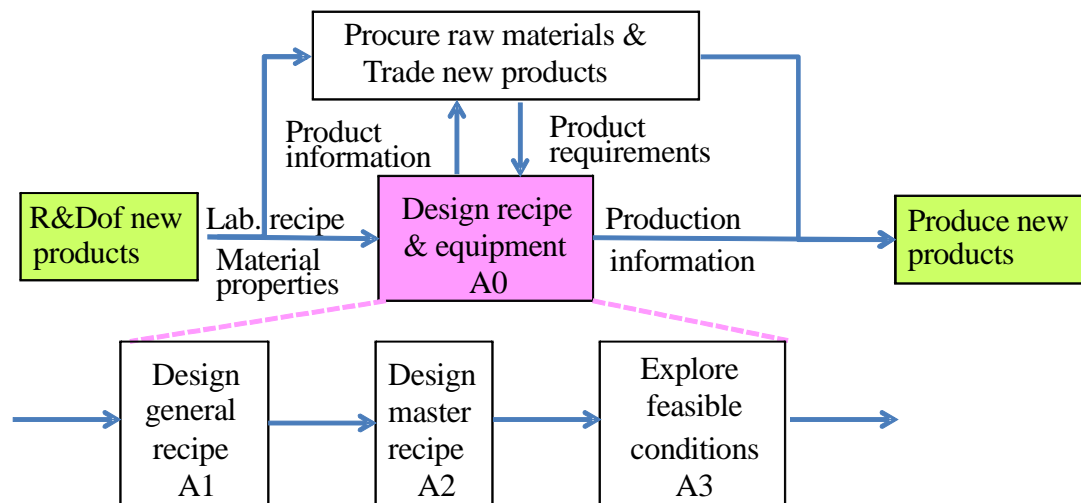


Fig.5.1 Activity model for “commercialize a new product”

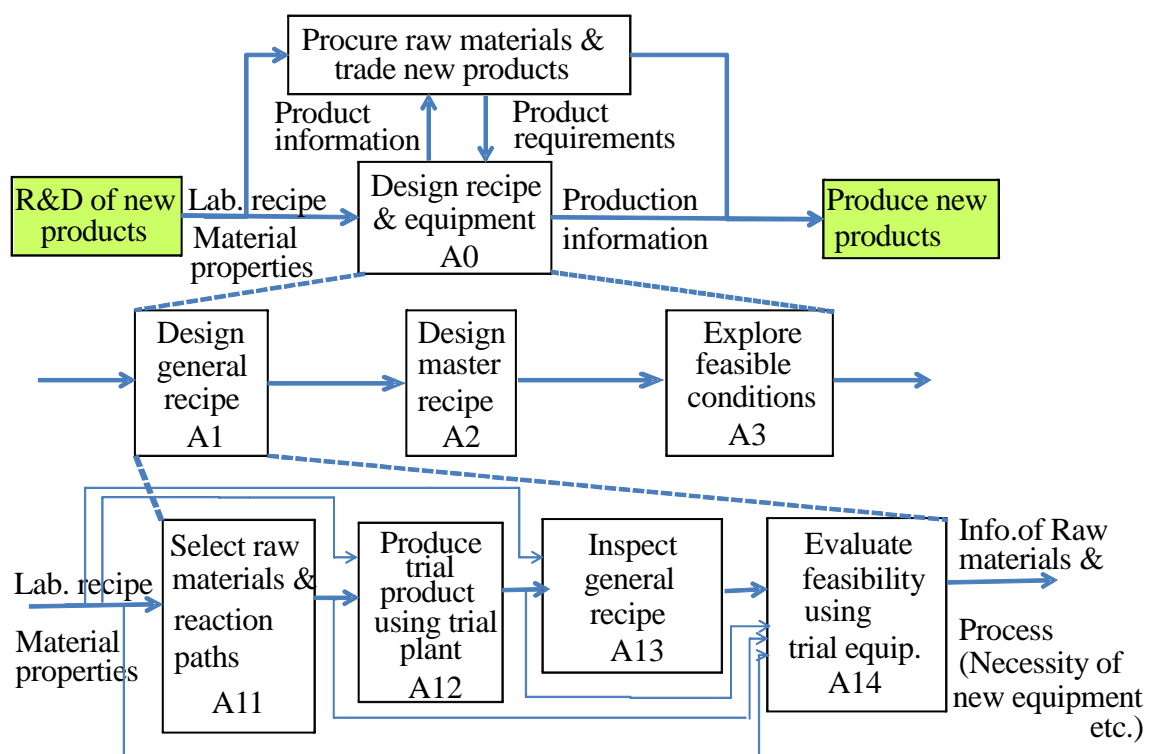


Fig.5.2 Deployment of activity “design general recipe”

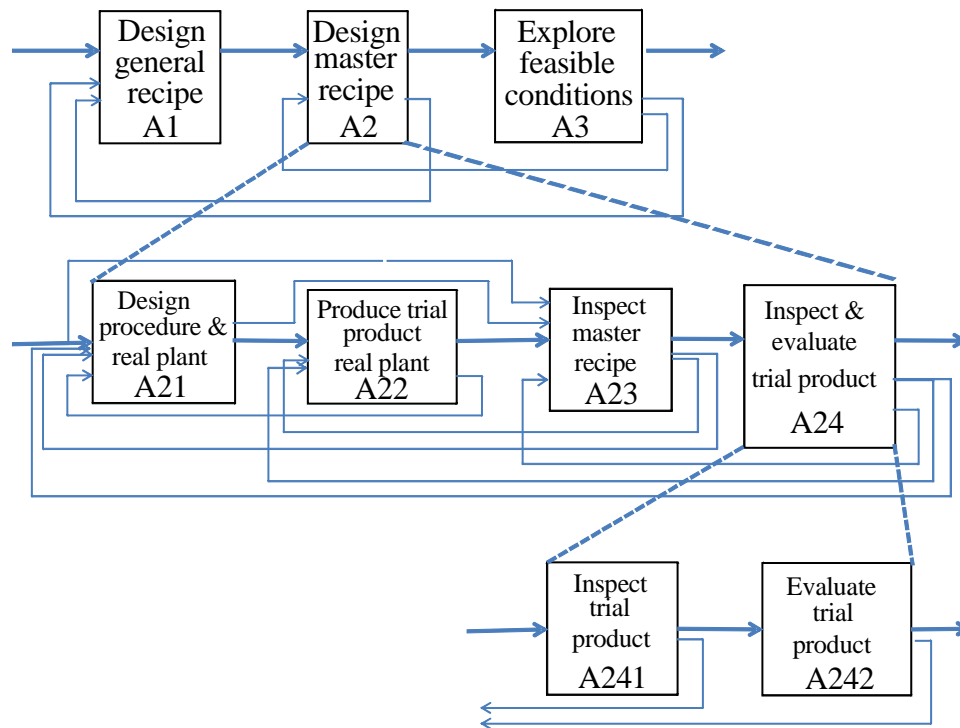


Fig.5.3 Deployment of activity “design master recipe”

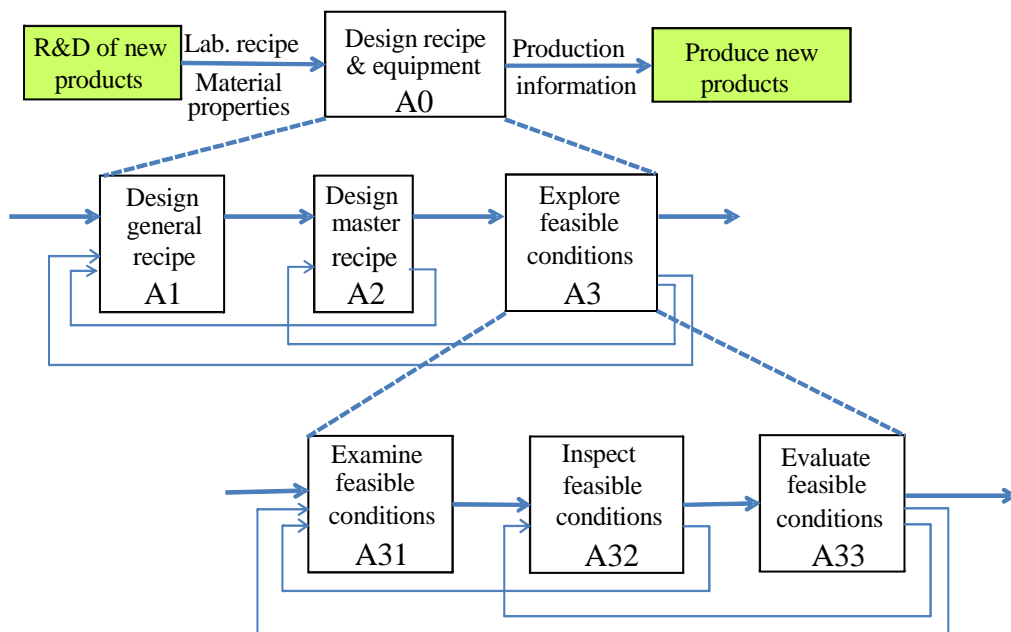


Fig.5.4 Deployment of activity “explore feasible conditions”

5.4 レシピの評価指標

5.4.1. 不確定要素を意識した設計業務のシミュレーション

5.2 節で述べたように通常のレシピには、製品品質に影響する全ての因子について記述されているわけではなく、また記述されている項目の値についてもレシピ作成時の様々な外乱により不確定要素を含んでいる。このようなレシピの不完全性が、製品品質、歩留まり、バッチ時間といった製造パフォーマンスの再現性に大きな影響を与えたと考えられる。それゆえ、バッチプロセスの性能を有効に発揮させるためには、不確定要素を排除し製品品質のコントロール因子を明確にすることが必要である。案件ごとに業務をこなすというスタンスでは、製品品質のコントロール因子を明確にする根拠を残しにくい。そこで、不確定要素の排除に関する評価指標を設定して、システムティックに不確定要素を減らしていく環境の構築が望まれる。本章では、各設計実務アクティビティで取り扱う情報の根拠の有無および業務手順／考え方の確からしさという観点から、対象アクティビティの出力に対してどの程度確信を持てるかという意味で「確信度」という指標を定義する。

レシピ設計のような開発業務は、業務全体としての確信度を向上させるように取り進めていくべきであるということが本章の基本的な考え方である。根拠を明確にすることにより、その場限りの検討ではなく、継続的に応用の利く組織的な技術力が培われていくことになる。

また、開発部門は製造部門に対してレシピの確信度を提示するとともに根拠が不明確な内容を伝え、製造部門は開発部門に対して生産活動を通じて、実績ベースで根拠の裏付けデータをフィードバックし、両部門が協業して確信度を向上させるように努める。このように確信度はレシピを確立する上で、開発業務と製造業務を有機的に連携する有効なコミュニケーションツールにもなると考えられる。

開発業務は、やり直しや試行錯誤が存在し、ウォーターフォール型のプロジェクトとはならないので、市場化までのスピードアップの検討にはPERTやCPMのような期間算出方法は適用できない。また開発によっては、製造現場で新たな製造条件を探索するものやR&Dから順に積み上げるものもある。これまでに示したIDEOモデルは、いずれの開発にも適用できるもので、そのモデル上のアクティビティの実行順序などの挙動により、開発の違いが表現できる。そのため、開発に対する戦略を検討するには、モデルでのシミュレーションの検討が必要になる。そのため、戦略ごとの確信度の変化や市場化までの期間を算出するシミュレーションを行うためのアクティビティモデルを提案する。

5.4.2 確信度モデルの定義

各設計実務アクティビティの確信度を、5.4.1 項で述べた「実務アクティビティで取り扱う情報の根拠」と「業務手順／考え方の確からしさ」の2つの確信度要素で構成する。さらに、実務アクティビティで取り扱う情報を「自業務にて独自に入手したもの」と「他業務の処理結

果」の確信度要素に大別する。前者の確信度は、その情報が生成された根拠により決定される。根拠の例としては、理論に基づいたもの、実験／実績に基づいたもの、文献に基づいたもの、モデルによるシミュレーション結果に基づいたもの、勘と経験に基づいたもの等が挙げられる。後者の確信度は、入手元業務の処理結果の確信度に依存する。一方、業務手順／考え方の確信度は、業務の難しさや経験の豊富さといった業務の性格により決定される。業務の性格の例としては、誰でもできるような機械的な作業、慣れたルーチンワーク、過去に経験した作業、経験はあるが難度の高い作業、全く経験の無い作業等が挙げられる。ここで、レシピ設計業務を進める中での確信度の変化を、つぎのように表現することにする。

レシピ設計は1製品のみではないので設計経験を表す回数を N とする。また、1回の設計において各アクティビティは複数回やり直す可能性があるため、アクティビティ実施回数を k とする。 N 回目のレシピ設計を開始してアクティビティ j の k 回目実施後の確信度を $Y_{N,j}(k)$ とし、入力情報に依存する確信度と自己努力により向上する確信度を、入力依存度 で分離して表現する。入力情報に依存する確信度は入力の数に関係なく、アクティビティ開始時における入力情報の確信度の中の最小値 $U_{N,j}^{\min}(k)$ で表現することにする。また、そのアクティビティの k 回目の実施前後の進展度を $X_{N,j,0}(k)$, $X_{N,j}(k)$ とし、一度に実施する時間 T_{exe} により不確定性が減少する割合が異なると考える。また、時定数 T を不確定性が減少する速さという業務の難しさを表現するパラメータとする。

$$Y_{N,j}(k) = \alpha \cdot U_{N,j}^{\min}(k) + (1 - \alpha) \cdot X_{N,j}(k) \quad (5.1)$$

$$X_{N,j}(k) = X_{N,j,0}(k) + (1 - X_{N,j,0}(k)) \left(1 - e^{-\frac{T_{exe}}{T}} \right) \quad (5.2)$$

アクティビティを一度に実施する時間 T_{exe} については、各アクティビティについてあらかじめ戦略として与えられるものとする。

$X_{N,j,0}(k)$ の設定に当たっては、商品群に対する開発能力を検討できるようにするため、類似の商品の開発による学習効果も考慮する。Eq. (5.3)は、開発プロジェクト開始時 ($k=1$) の初期値の更新を示す。この学習による初期値の改善は、前回開発の最終実行時の初期値と最終値の内分比 ϕ をパラメータとして表現する。ここで、 K は $N-1$ 回目のレシピ設計におけるアクティビティ j の実行回数を表す。

$$X_{N,j,0}(1) = (1 - \phi) \cdot X_{N-1,j,0}(K) + \phi \cdot (1 - X_{N-1,j}(K)) \quad (5.3)$$

1つのレシピ設計内におけるやり直しの際の確信度については、原料などの入力条件が変更されている可能性があるため、前回実行時の確信度に単純に積み上げることはならない。しかし、前回よりも情報が増えているので、業務開始時の不確定性は減衰しているものとして初期値を次のように更新することにする。は不確定性の減衰の比率を示しフィードバック情報が入手されるたびに更新されるものとする。

$$X_{N,j,0}(k) = X_{N,j,0}(k-1) + \beta \cdot (1 - X_{N,j,0}(k-1)) \quad (5.4)$$

アクティビティ j の $k-1$ 回目と k 回目の実施後の確信度の変化例を Figure 5.5 に示す。

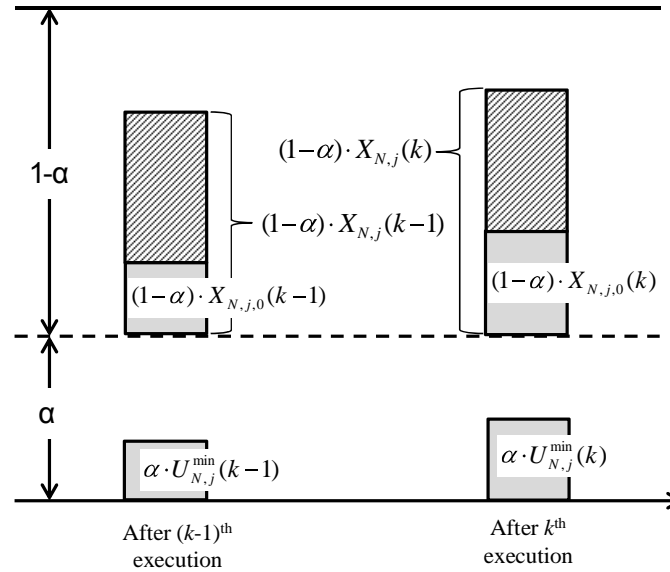


Fig.5.5 Transition of progress index

審査を行うアクティビティについては、その審査の厳しさを Y_{set} として、審査対象の確信度 U と Y_{set} の差に応じて、審査結果が異なるものとする。確信度が低くても、審査を通過することもあることを確率を用いて表現することにする。不合格になる確率を Z とし、次式で表す。

$$Z = \begin{cases} 0 & (if U \geq Y_{set}) \\ (Y_{set} - U) & (if U < Y_{set}) \end{cases} \quad (5.5)$$

ここで、べき乗を示すパラメータ α は審査の通過しやすさを調整するパラメータで、 α を 1 より大きくすると合格しやすく、1 より小さくすると不合格になりやすくなる。

審査期間 T_{out} を審査アクティビティのパラメータとして設定し、審査期間が終了し、上記の確率で合格になれば、審査によって審査対象が変化することはないので、入力と同じ確信度が、審査アクティビティの出力の確信度として出力される。

$$Y = U \quad (5.6)$$

不合格時には確信度は出力されず、やり直し指示を出力する。モデルでは、やり直しの指示を通知する可能性のあるアクティビティすべてに矢印を表記している。ただし、バリエーショ

ンとして、通知先のアクティビティを1つにするか複数にするかを選択可能としている。

5.4.3 アクティビティモデルの実行制御

各アクティビティがコンカレントに実行されるシミュレーションを行うため、入力情報が新たにそろったら、あるいはやり直しの指示が到着したら業務を開始できるものとした。ただし、同一アクティビティでは業務を開始したら終了するまでは新たな入力ややり直し指示が到着しても、それらは待機リストに蓄積され業務はそのまま継続される。その業務の実行が終了すると待機リストに蓄積しているやり直し指示の数だけ、情報は増えているので、その個数分、進展度の初期値 $X_{N,j,0}(k)$ をパラメータ β により更新する。入力としては最新の値を用いて、再

びその業務を開始することになる。待機リストにやり直し指示が蓄積されていない場合も、入力値がその業務を開始した時刻以降に変動していれば、業務を再度開始する。やり直し指示も蓄積されておらず、かつ入力も変動していない場合は、そのアクティビティは入力の変化もしくはやり直し指示があるまで業務を実行せずに待機する。

R & Dから順にアクティビティを実施する場合、最初は、すべてのアクティビティが出力をもたない状態を初期状態とする。R & Dからの入力情報が最初のアクティビティに入ると、そのアクティビティのみが開始され、業務が終了すると待機状態となる。そして、次のアクティビティが入力の変化を検知して業務を開始する。審査アクティビティでは、不合格の場合、複数のやり直し指示先の中で最低の確信度を出力しているアクティビティを一つ選択し、やり直し指示を出す。その審査アクティビティは、入力が増えるまで待機状態となり、やり直し指示を受けたアクティビティが開始される。このようにすべてのアクティビティは、新たな入力もしくはやり直し指示を受けるまで待機状態になっている。アクティビティの出力が他の1つのアクティビティのみの入力もしくはやり直し指示であればシーケンシャルな挙動になる。

製造現場での製造条件調整で済ませる開発は、Figure 5.3におけるA21の確信度が高い状態であり、製造現場で抑えるべき情報が不足しているためにA22の業務の確信度が低いという状態からシミュレーションを始めることで表現される。製造現場での調整を続けてA22の確信度を向上させても、A23での評価が不合格になった場合は、A23以前で、低い確信度を出力している業務をやり直し先として選択して、シーケンスに開発をつづけるというシミュレーションも可能だし、コンカレントのように、見直しが開始できる業務が複数存在するときには、それらを同時に始めるというシミュレーションも可能である。

既製品と類似の商品開発においては、製造現場の製造条件(フォミュラ)の調整だけでレシピ開発を完了できる状況もあるが、シミュレーションにおいては、上流の確信度を十分に高く設定することにより、A22の努力だけで確信度を向上させることになり、そのような商品開発の状況を表現できる。

最初からコンカレントに業務を進めるときには、各業務の入力に相当する上流の業務の出力

の確信度が、すでに事前の知見により得られている状態を初期状態とする．そして、やり直し指示あるいは新たな評価結果を複数業務に対してフィードバックすれば、コンカレントに複数の業務が進行する開発を表現できる．

このように、シミュレーションにおける業務の挙動は、実行業務の確信度(進展度)の初期値と評価業務のフィードバック先の選択方法で制御することができる．

5.5 アクティビティのパラメータに関する事項と業務の入出力の整理

確信度の変化を前節で示したように表現し、新製品の市場化までのスピードアップを実現するための開発戦略の有効性を、確信度の向上という観点でI D E F 0モデルに基づき、シミュレーションを実施して検討することを考える．

それぞれの業務の確信度の入力依存度や進展度の初期値、時定数などのパラメータを決定するために考慮すべき事項を業務毎に Figure 5.6 から 5.13 に整理する．これらの事項の充実により、確信度が向上することになるが、確信度は0から1の数値で表すので、0.1と表すか0.2と表すか、その数値での表現は主観的なものになる．しかし、このモデルは開発から製造までの関係する部門の関係者が連携し、課題及び戦略を共通に検討するために利用するものなので、たとえその数値が主観的であっても、数値により「可視化」でき、関係者が共通に議論できれば数値による相対的な比較は有意義であると期待できる．

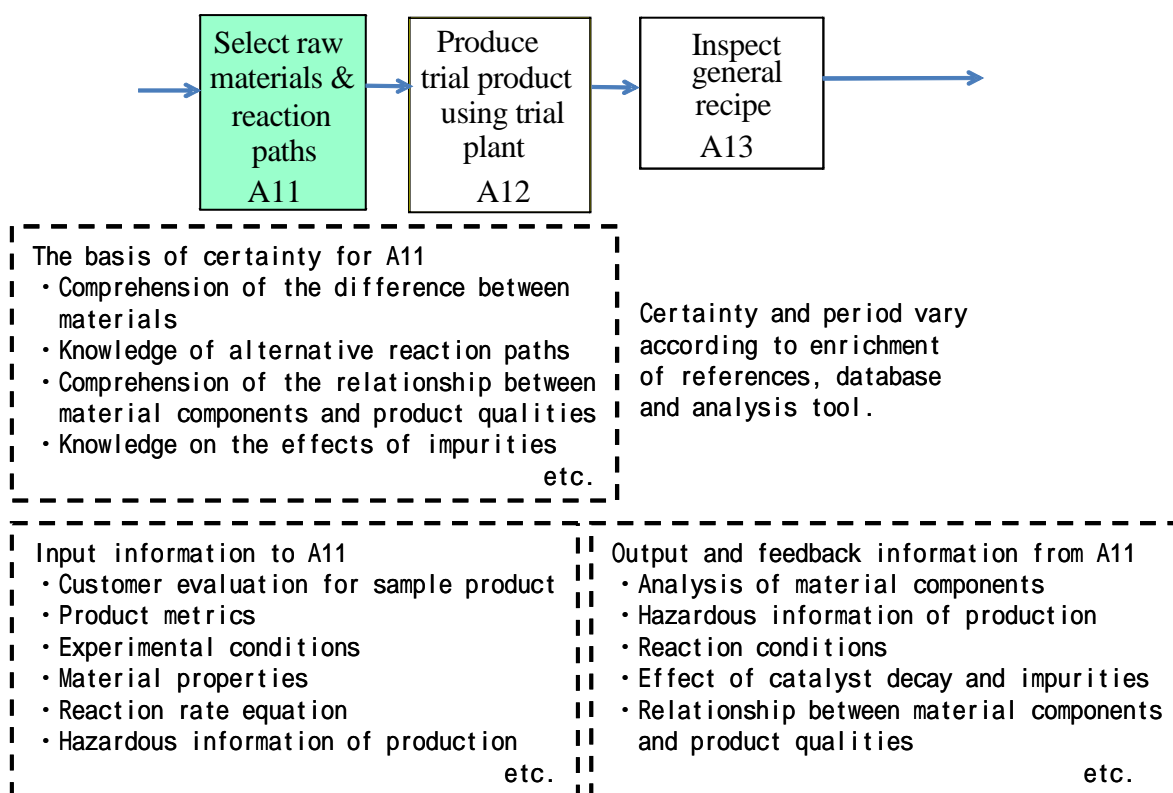


Fig.5.6 The basis of certainty and input/output/feedback information for A11

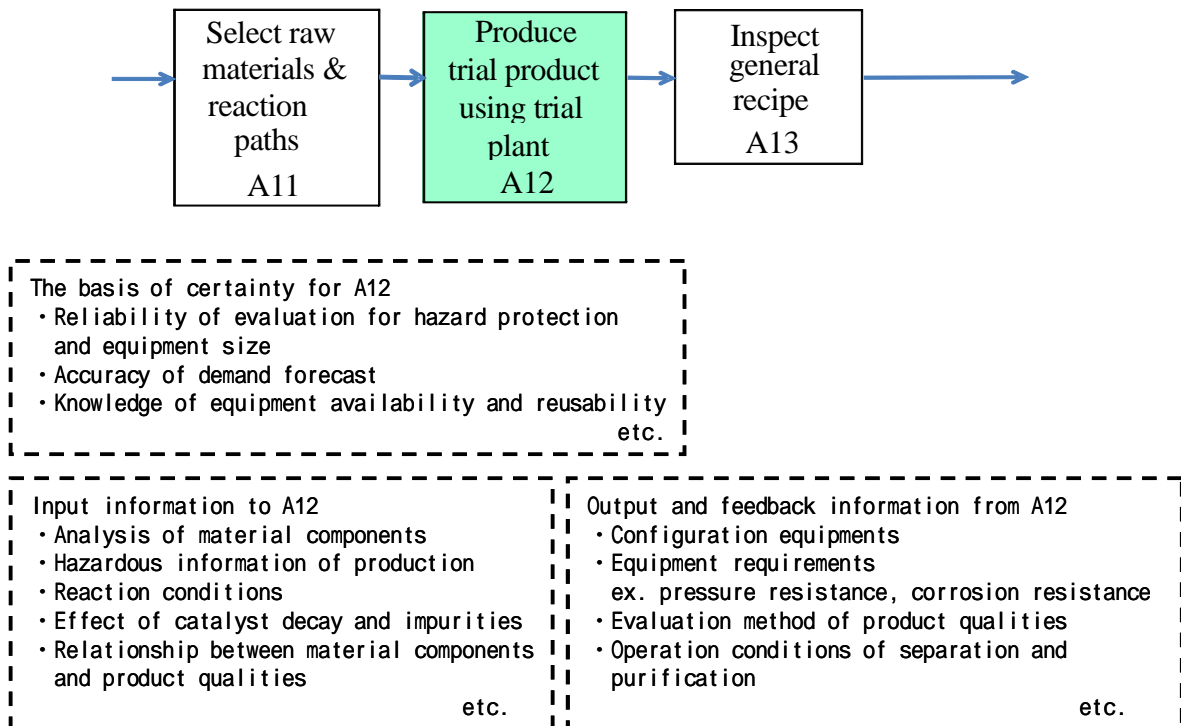


Fig.5.7 The basis of certainty and input/output/feedback information for A12

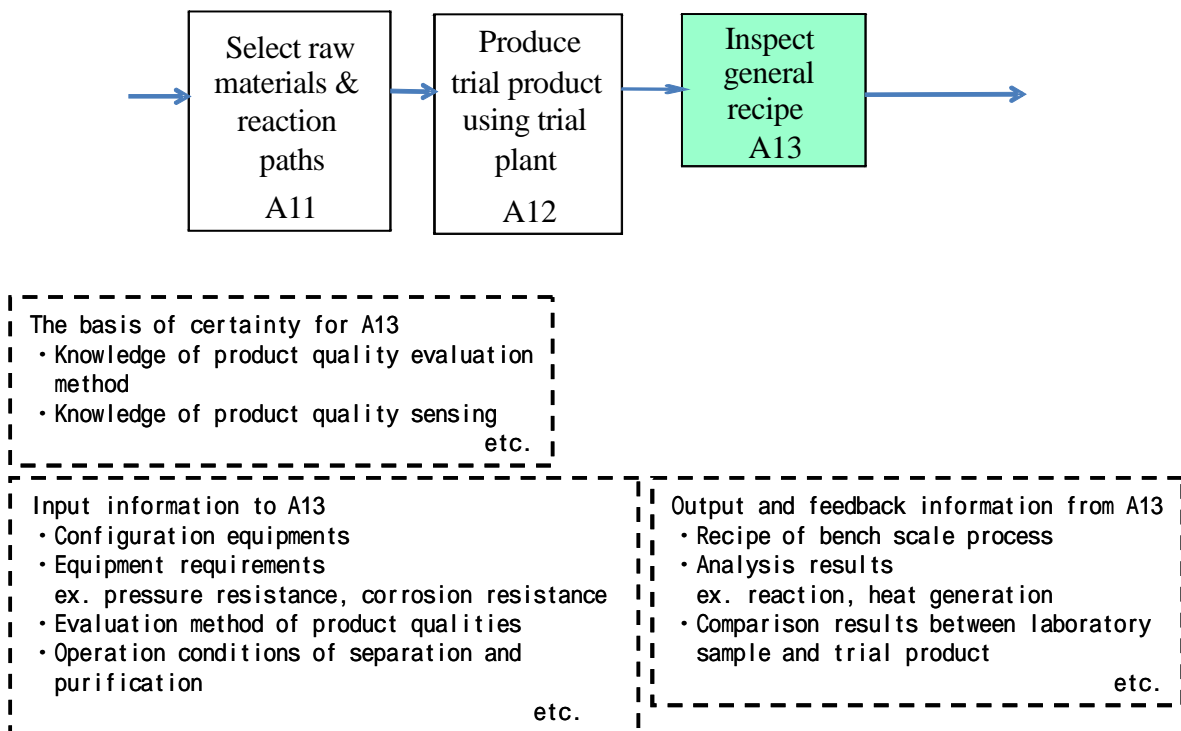


Fig.5.8 The basis of certainty and input/output/feedback information for A13

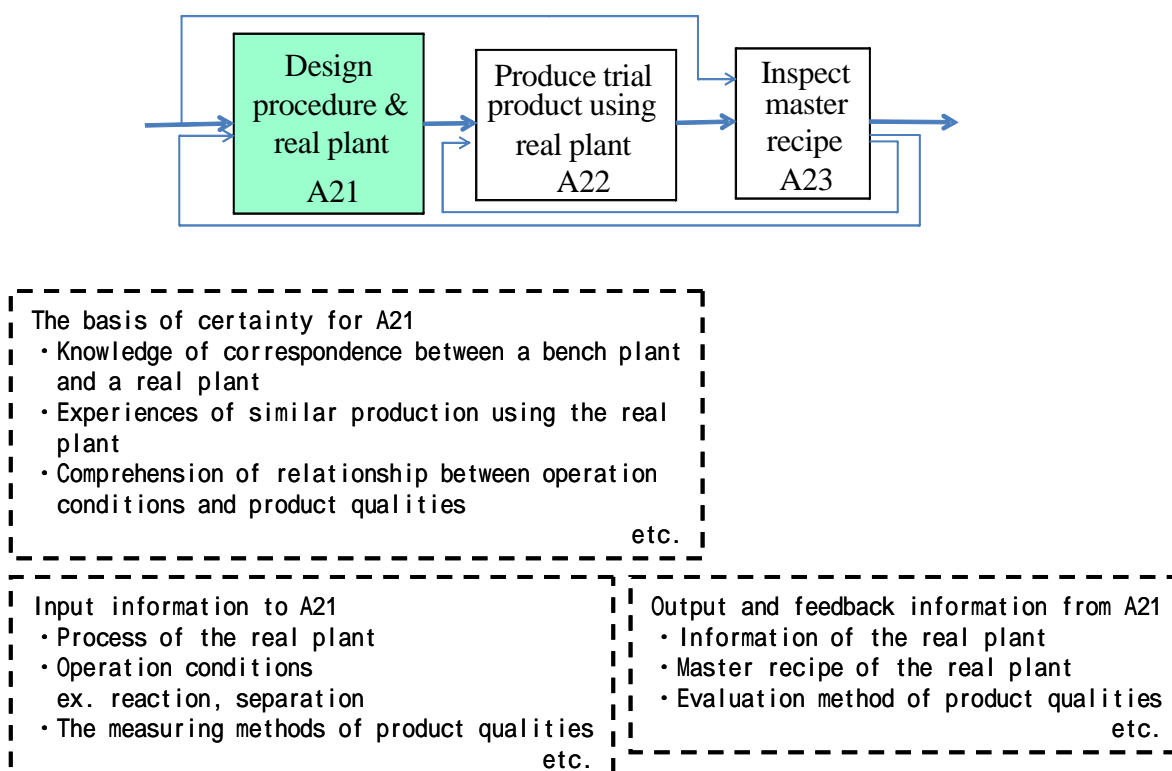


Fig.5.9 The basis of certainty and input/output/feedback information for A21

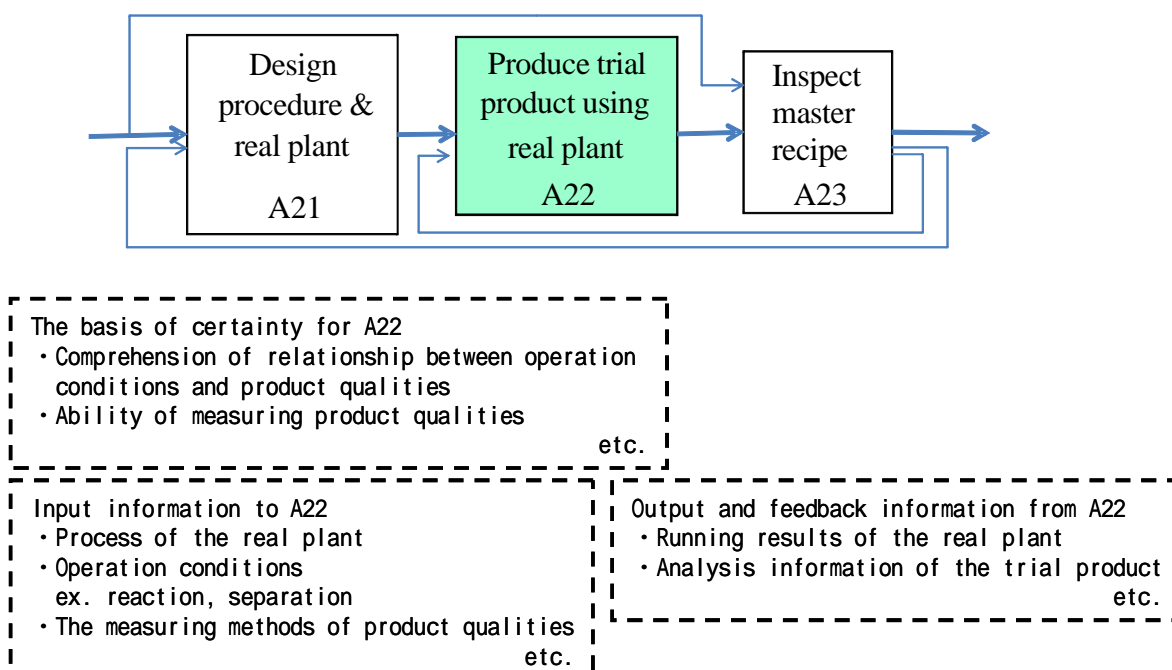


Fig.5.10 The basis of certainty and input/output/feedback information for A22

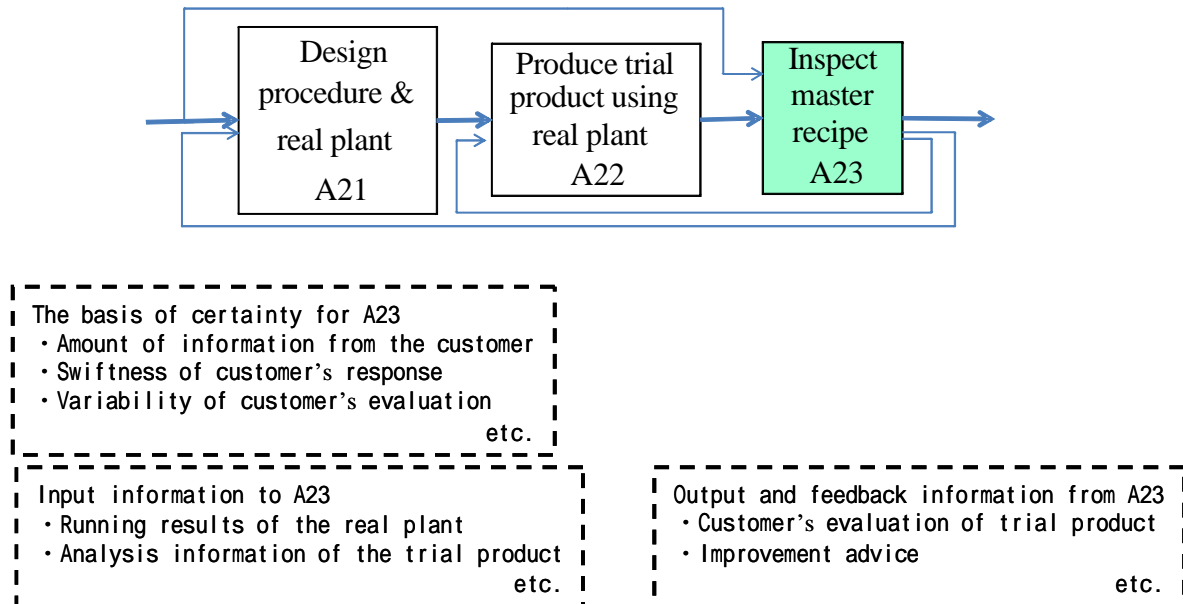


Fig.5.11 The basis of certainty and input/output/feedback information for A23

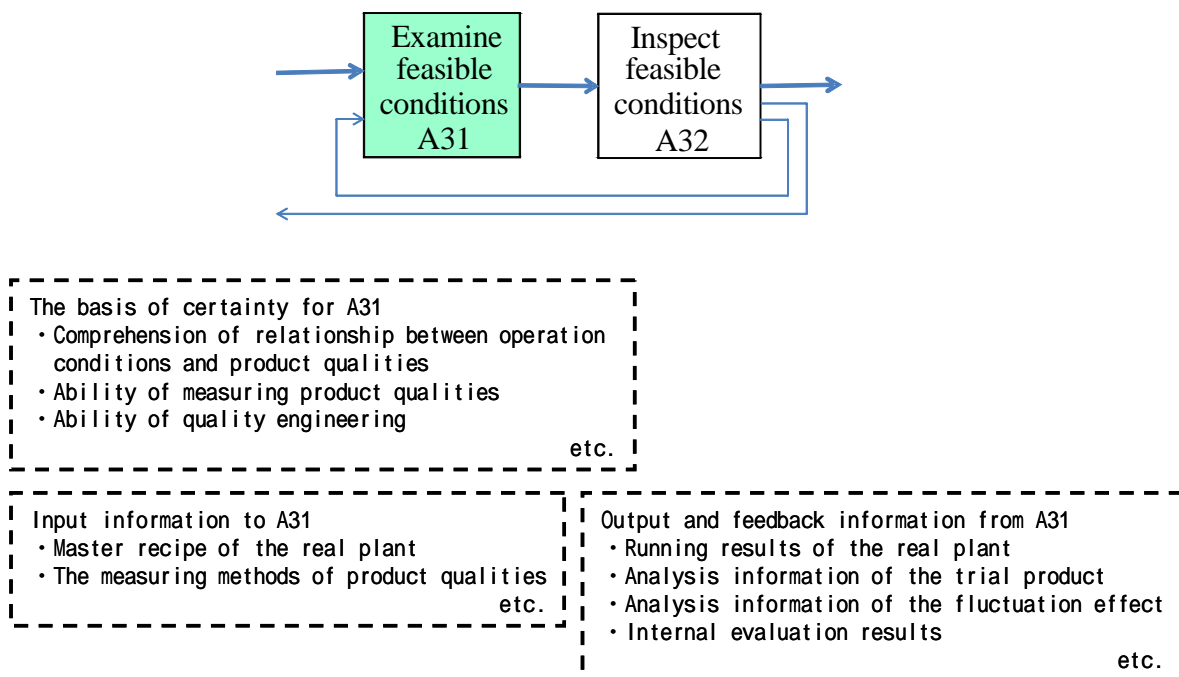


Fig.5.12 The basis of certainty and input/output/feedback information for A31

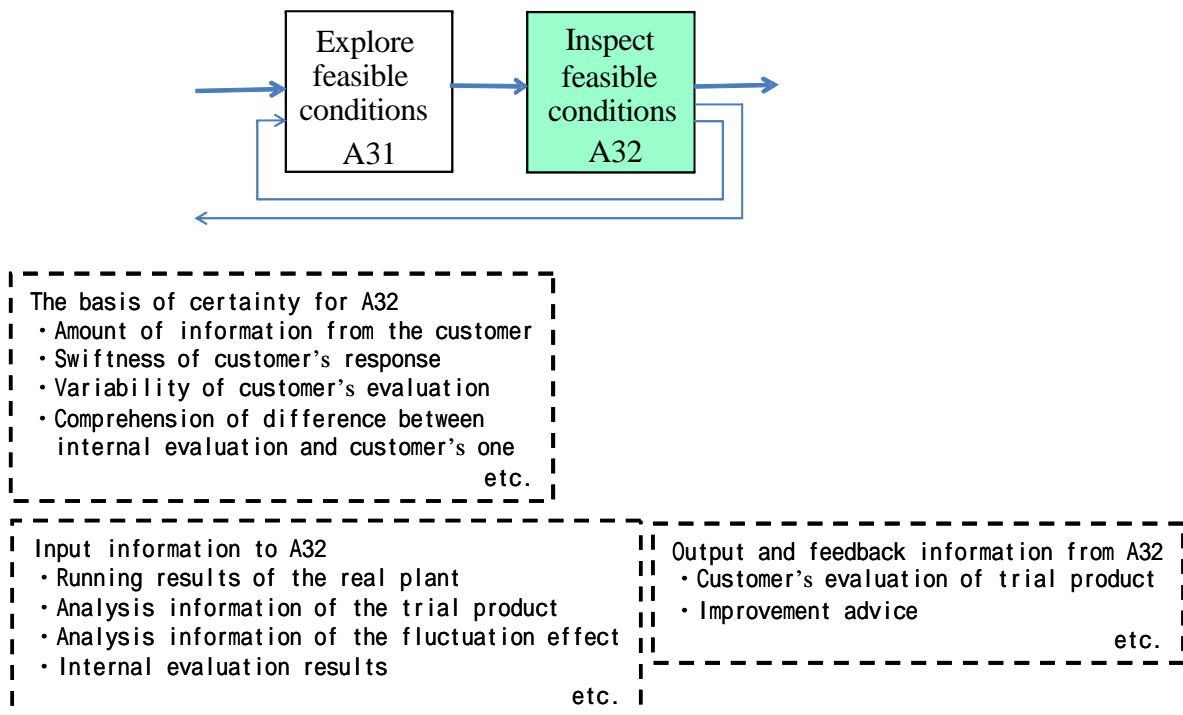


Fig.5.13 The basis of certainty and input/output/feedback information for A32

5.6 レシピ設計業務管理へのシステマティックアプローチ

5.6.1 確信度による業務計画意思決定支援

確信度を適用したレシピ設計業務計画策定について述べる。

まず、開発部門から製造部門まで関連する担当者で、現状の各業務の状態を表現するモデルパラメータを5.5節で示した項目に基づいて検討する。各実行業務に対しては5.4節で示した確信度モデルのパラメータ群である以下の項目を決定する。

- 入力依存度
- 進展度の初期値 $X(0)$
- 進展度の時定数 T
- 一回あたりの業務実行時間 T_{exe}
- やり直し時の進展度の初期値の更新パラメータ
- 過去の業務に基づく学習効果による進展度の初期値の更新パラメータ

評価業務に対しては、

- 審査の閾値 Y_{set}
- 審査期間 T_{out}
- 合格確率の調整パラメータ（本シミュレーションでは0.125を設定）

が調整パラメータになる。

つぎに、レシピ設計業務取り進めの戦略を設定し、その戦略の有効性を比較検討する。

戦略の設定は、確信度モデルおよび評価業務のパラメータ変更と、評価業務での評価結果の報告およびやり直し指示方法の選択により表現するものとする。モデルパラメータを変更し、そのモデルパラメータの変化の有効性を検討し、効果的なモデルパラメータに対応する対策を検討することを考える。

マイクロソフト社の MS-EXCEL にて作成したシミュレーションプログラムのユーザーインタフェースを Figure 5.14、5.15 に示す。

開発業務シミュレーション



アクティビティの数を増やす時には、B4セルとK4セルの数値を変更し、AcitvityとEvalActivityと結果の間、は1列とすること。
Indexは実行アクティビティと評価アクティビティで通し番号とし、基本的な実行順を大小関係で示した数値とする。

Class Activity(index)

Property	Index	アクティビティ番号	0	11	12	21	22	31
Name	名前	R&D	A11	A12	A21	A22	A31	
Activity	アクティビティ	R&D of new product	Select Raw materials and Reaction paths	Produce trial products using Trial plant	Design procedure and construct Plant	Produce trial products using Real plant	Examine Feasible conditions	
Tset	稼働時間設定	7	3	10	10	14	21	
Tconst	時定数(day)	7	3	10	10	14	21	
X0	初期値	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
Alpha	入力への依存度	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Beta	やり直しでの不確定減衰の率	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Gamma	やり直ししない確信度の初期値	1	1	1	1	1	1	
Cost	時間コスト	1	1	1	1	1	1	
InNum	アクティビティ入力の個数	0	1	2	2	1	1	
InActp(1)	入力(1)のActivity.Index		0	0	0	21	23	
InActp(2)	入力(2)のActivity.Index			11	13			
InActp(3)	入力(3)のActivity.Index							
InActp(4)	入力(4)のActivity.Index							
InActp(5)	入力(5)のActivity.Index							
InActp(6)	入力(6)のActivity.Index							
InActp(7)	入力(7)のActivity.Index							
InActp(8)	入力(8)のActivity.Index							
InActp(9)	入力(9)のActivity.Index							
InActp(10)	入力(10)のActivity.Index							
ActNo	通し番号	1	2	3	5	6	8	
InCol(1)	入力(1)の列番号			3	3	6	13	
InCol(2)	入力(2)の列番号				4	12		
InCol(3)	入力(3)の列番号							
InCol(4)	入力(4)の列番号							
InCol(5)	入力(5)の列番号							
InCol(6)	入力(6)の列番号							
InCol(7)	入力(7)の列番号							
InCol(8)	入力(8)の列番号							
InCol(9)	入力(9)の列番号							
InCol(10)	入力(10)の列番号							

Class EvalActivity(index)

Property	Index	アクティビティ番号	13	23	32
Name	名前		A13	A23	A32
Activity	アクティビティ		Inspect General Recipe	Inspect Master Recipe	Evaluate Feasible conditions
Tset	稼働時間設定		2	5	5
Yset	確信度の閾値		0.9	0.9	0.9
Prai	確率の調整[$x,y,z=2^{\text{Prai}}$][-3,-2,-1,0,1,2,3]		-3	-3	-3
Broadcast	合格時にフィードバック(0,1しないする)		1	1	1
Unique	見直し指示先を限る(0,1しないする)		0	0	0
Cost	時間コスト		1	1	1
InNum	アクティビティ入力の個数		1	1	1
InActp(1)	入力(1)のActivity.Index			12	22
InActp(2)	入力(2)のActivity.Index				
InActp(3)	入力(3)のActivity.Index				
InActp(4)	入力(4)のActivity.Index				
InActp(5)	入力(5)のActivity.Index				
InActp(6)	入力(6)のActivity.Index				
InActp(7)	入力(7)のActivity.Index				
InActp(8)	入力(8)のActivity.Index				
InActp(9)	入力(9)のActivity.Index				
InActp(10)	入力(10)のActivity.Index				
RNum	見直しの回数		3	5	6
Fbp(1)	見直し(1)のActivity.Index		0	0	0
Fbp(2)	見直し(2)のActivity.Index		11	11	11
Fbp(3)	見直し(3)のActivity.Index		12	12	12
Fbp(4)	見直し(4)のActivity.Index			21	21
Fbp(5)	見直し(5)のActivity.Index			22	22
Fbp(6)	見直し(6)のActivity.Index				31
Fbp(7)	見直し(7)のActivity.Index				
Fbp(8)	見直し(8)のActivity.Index				
Fbp(9)	見直し(9)のActivity.Index				
Fbp(10)	見直し(10)のActivity.Index				
ActNo	通し番号		4	7	9
InCol(1)	入力(1)の列番号		5	7	8
InCol(2)	入力(2)の列番号				
InCol(3)	入力(3)の列番号				
InCol(4)	入力(4)の列番号				
InCol(5)	入力(5)の列番号				
InCol(6)	入力(6)の列番号				
InCol(7)	入力(7)の列番号				
InCol(8)	入力(8)の列番号				
InCol(9)	入力(9)の列番号				
InCol(10)	入力(10)の列番号				
FbCol(1)	見直し指示先(1)の列番号		3	3	3
FbCol(2)	見直し指示先(2)の列番号		4	4	4
FbCol(3)	見直し指示先(3)の列番号		5	5	5
FbCol(4)	見直し指示先(4)の列番号			6	6
FbCol(5)	見直し指示先(5)の列番号			7	7
FbCol(6)	見直し指示先(6)の列番号				8
FbCol(7)	見直し指示先(7)の列番号				
FbCol(8)	見直し指示先(8)の列番号				
FbCol(9)	見直し指示先(9)の列番号				
FbCol(10)	見直し指示先(10)の列番号				

Time	時刻	45
Yfinal	最終のY	0.89
CostTotal	総コスト	1.45
MinX	Xの最小値	0.90
MaxX	最終のY	0.96
SumIterNG	やり直し回数総数	1



Variable	Y	確信度	0.90	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89
Iter	実行回数	0	1	2	4	3	1	
State	状態(-1,0,1:Wait,Act,Finish)	1	1	1	1	0	1	
X	進展度	0.90	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	
Ymax	確信度の上限	1.00	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	
Umin	入力の最小値	0.00	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	
X0P	進展度の初期値	0.72	0.88	0.88	0.85	0.85	0.84	
YoP	確信度の初期値	0.72	0.84	0.84	0.81	0.81	0.79	
Tstart	最近の開始時刻	-1	0	10	33	42	19	
Tend	最近の終了時刻	-10	3	20	43	42	40	
Tres	終了予定時刻					56		
Yres	出力予定値					0.90		
Tsum	時間の積算値	0	3	20	40	42	21	
MemFb	記録見直し指示到着回数	0	0	0	1	0	0	
Tfb(1)	見直し指示到着時刻リスト(古い順)				47			
Tfb(2)	見直し指示到着時刻リスト							
Tfb(3)	見直し指示到着時刻リスト							
Tfb(4)	見直し指示到着時刻リスト							
Tfb(5)	見直し指示到着時刻リスト							
Tfb(6)	見直し指示到着時刻リスト							
Tfb(7)	見直し指示到着時刻リスト							
Tfb(8)	見直し指示到着時刻リスト							
Tfb(9)	見直し指示到着時刻リスト							
Tfb(10)	見直し指示到着時刻リスト							

Variable	Y	確信度	0.91	0.90	0.89
Iter	実行回数	2	2	1	
State	状態(-1,0,1:Wait,Act,Finish)	1	0	1	
Judge	判定結果(-1,1:不合格,合格)	1	-1	1	
Ftarget	見直し指示相手(0なし)	0	6	0	
Tstart	最近の開始時刻	20	42	40	
Tend	最近の終了時刻	22	33	45	
Tres	終了予定時刻			47	
Yres	出力予定値		0.90		
Jadgeres	判定予定値		-1		
Tsum	時間の積算値	4	10	5	
IterNG	不合格回数	0	1	0	

Fig.5.14 Simulation parameter input view

シミュレーション条件

総試行回 TrialNum=100

学習効果 Phi=0.1

学習回数 Nlearn=5

最初から Finit=0

並列処理 Concurrency=1

トータル試行回数(学習回数の整数倍が望ましい)

X0new=(1-Phi)*X0old+Phi*Xfinal

学習効果を考慮する試行回数 0:確信度最低のアクティビティから開始,コンカレントならすべてから

Start

Stop

ActNo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Index	0	11	12	13	21	22	23	31	32
Activity	R&D of new product	Select Raw materials and Reaction paths	Produce trial products using Trial plant	Inspect General Recipe	Design procedure and construct Plant	Produce trial products using Real plant	Inspect Master Recipe	Examine Feasible conditions	Evaluate Feasible conditions
Col	3	4	5	12	6	7	13	8	14
EvalAct	0	0	0	1	0	0	1	0	1
Name	R&D	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32

試行回数 Trial=	100			Ilearn=			4								
Ave	182	0.84	367	0.87	0.94	11	1.21	3.97	7.36	7.35	4.73	6.74	6.39	3.24	3.24
Min	45	0.63	135	0.74	0.81	0	0	1	2	2	1	2	2	1	1
Max	940	0.93	1710	0.93	0.98	70	9	24	45	45	20	33	33	12	12
Std	197	0.08	322	0.05	0.04	15	2.05	4.82	9.06	9.06	3.27	5.78	5.96	2.73	2.73
Trial	Term	Yfinal	CostTotal	MinX	MaxX	SumIter									
1	192	0.63	343	0.74	0.86	14	0	5	11	11	3	6	6	2	2
2	203	0.71	384	0.82	0.91	14	3	7	10	10	3	6	6	3	3
3	427	0.83	740	0.88	0.95	27	4	8	15	15	10	16	16	4	4
4	87	0.86	211	0.90	0.96	2	0	1	2	2	3	4	4	3	3
5	45	0.88	135	0.91	0.96	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
6	108	0.90	237	0.91	0.97	3	0	1	2	2	3	4	4	4	4
7	763	0.82	1256	0.85	0.92	54	5	16	31	31	13	23	23	9	9
8	232	0.87	387	0.88	0.95	13	2	5	8	8	3	4	4	6	6
9	101	0.90	233	0.89	0.96	4	0	1	2	2	4	6	6	2	2
10	45	0.91	135	0.90	0.96	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
11	45	0.92	135	0.91	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
12	45	0.93	135	0.91	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
13	797	0.81	1272	0.83	0.92	50	4	14	27	27	15	26	26	9	9
14	216	0.87	551	0.91	0.95	19	5	10	16	16	5	6	6	5	5
15	94	0.89	214	0.91	0.96	3	0	1	2	2	4	5	5	2	2
16	45	0.91	135	0.92	0.96	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
17	45	0.91	135	0.92	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
18	45	0.92	135	0.93	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
19	252	0.69	473	0.74	0.83	16	0	3	7	7	6	10	10	5	5
20	168	0.76	417	0.82	0.91	19	3	9	15	15	3	7	7	1	1
21	200	0.83	574	0.89	0.94	18	4	8	12	12	7	8	8	6	6
22	206	0.89	330	0.90	0.95	8	0	1	2	2	4	7	7	5	5
23	66	0.90	185	0.91	0.96	1	0	1	2	2	3	4	4	2	2
24	45	0.91	135	0.91	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
25	456	0.68	667	0.79	0.90	27	2	10	20	20	7	11	11	4	4
26	252	0.77	607	0.84	0.94	23	5	10	16	16	7	12	12	2	2
27	238	0.87	493	0.90	0.95	13	1	2	5	5	6	8	8	8	8
28	45	0.89	135	0.91	0.96	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
29	66	0.90	185	0.91	0.97	1	0	1	2	2	3	4	4	2	2
30	45	0.91	135	0.92	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
31	373	0.65	478	0.74	0.86	20	0	5	10	10	7	13	13	1	1
32	190	0.77	531	0.87	0.93	23	5	11	17	17	2	3	3	7	7
33	106	0.82	230	0.88	0.94	3	0	1	2	2	3	5	5	3	3
34	101	0.85	267	0.90	0.95	5	1	3	4	4	3	5	5	3	3
35	143	0.89	295	0.91	0.96	6	0	1	2	2	5	6	6	4	4
36	45	0.91	135	0.91	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
37	940	0.81	1710	0.86	0.95	70	9	24	45	45	20	33	33	8	8
38	101	0.84	211	0.90	0.96	3	0	1	2	2	3	4	4	3	3
39	45	0.86	135	0.90	0.96	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
40	45	0.87	135	0.91	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
41	66	0.89	185	0.92	0.97	1	0	1	2	2	3	4	4	2	2
42	45	0.90	135	0.93	0.98	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
43	703	0.74	808	0.74	0.86	26	0	5	11	11	9	15	15	11	11
44	438	0.85	860	0.88	0.94	35	7	15	26	26	7	12	12	6	6
45	73	0.87	183	0.89	0.95	2	0	1	2	2	4	5	4	1	1
46	87	0.89	211	0.90	0.96	2	0	1	2	2	3	4	4	3	3
47	45	0.90	135	0.91	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
48	45	0.91	135	0.91	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
49	526	0.73	1130	0.81	0.93	49	7	20	40	40	10	18	17	4	4
50	258	0.82	396	0.87	0.94	11	1	2	4	4	6	9	9	4	4
51	87	0.83	212	0.88	0.95	3	0	1	2	2	5	6	5	1	1
52	171	0.89	315	0.91	0.96	6	0	1	2	2	3	4	4	7	7
53	45	0.91	135	0.91	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
54	45	0.92	135	0.92	0.97	0	0	1	2	2	3	3	2	1	1
55	206	0.66	311	0.74	0.83	12	0	4	8	8	3	5	5	3	3
56	87	0.70	198	0.76	0.86	4	0	1	2	2	5	5	5	1	1
57	205	0.77	437	0.80	0.90	11	1	3	5	5	6	9	9	5	5
58	45	0.80	148	0.85	0.92	4	1	3	4	4	2	2	2	1	1
59	45	0.82	145	0.87	0.93	1	1	2	2	2	3	3	2	1	1
60	222	0.89	427	0.90	0.95	12	2	4	7	7	4	5	5	7	7

5.6.1 ケーススタディ

この節では、提案したシミュレーションによるいくつかのケースを想定した計算結果を示し、同じ戦略でも状況に応じてその有効性が異なることを示し、関係部門の担当者間で現状を共通認識するとともに改善対策の有効性も併せて検討することの必要性を示す。

[開発対象のバリエーション]

開発対象の難しさのバリエーションとして、つぎの5つを設定した。

(Case1) 初期の知見は乏しく各業務の入力依存度が高く、実行期間を伸ばしても確信度の大きな向上が見込めず、やり直しの効果も低い

$$X(0)=0.1 \quad =0.7 \quad =0.05$$

(Case2) 初期の知見は乏しく各業務の入力依存度は低く、やり直しの効果は高い

$$X(0)=0.1 \quad =0.3 \quad =0.2$$

(Case3) 初期の知見は乏しく各業務の入力依存度は低く、やり直し効果は低く時定数が大きい

$$X(0)=0.1 \quad =0.3 \quad =0.05 \quad T \text{は他のケースの2倍の値}$$

(Case4) 事前の知見が豊かで、入力依存度もやり直し効果もある。

$$X(0)=0.5 \quad =0.5 \quad =0.1$$

(Case0) 上記のケースの中庸

$$X(0)=0.3 \quad =0.5 \quad =0.1$$

シミュレーションでのバリエーションコードを C4、C1、C2、C3、C0 と表すことにする。

[学習効果の有無]

商品群としての知識の蓄積が、新製品の開発に有効である場合の学習効果を想定し、各ケースで学習効果の有無により、開発期間などの指標がどのように変化するか検討する。

学習効果無しは、Eq. (5.5)のパラメータ ϕ がゼロで表現し、学習効果有りの場合は、 ϕ を0.1、類似製品の開発により学習効果が継続的に働く開発の回数 N_{learn} を5回とし、5製品開発する毎に従来と全く異なる製品を開発する前提とした。シミュレーションでのバリエーションコードをN、Lで表し、N： $\phi=0$ 、L： $\phi=0.1$ と設定する。

[実行の制御]

実行順序の制御は、実行アクティビティの初期状態と審査アクティビティでの審査結果の報告とやり直し指示の通知方法により変更できるが、そのバリエーションを以下のように表現し、2つのケースを作成した。FCBU(Finit, Concurrent, Broadcast, Unique)=1001、0110で表す。

- ・初期状態を出力するかしないか F=1 or 0
- ・開始可能なアクティビティは複数か、最小確信度のアクティビティか C=1 or 0
- ・審査結果の通知先を全アクティビティにするか、1つのみにするか B=1 or 0
- ・やり直し指示を最小確信度のもの1つに絞るか、複数に配信するか U=1 or 0

FCBU = 1001

新規製品に対する開発をシーケンシャルに実行する．

FCBU = 0110

コンカレントに実行可能なアクティビティは並列に始め、単位時間あたりの試行を増やすことにより合格しやすさを高める．審査結果を合否に関係なくすべてに通知する確率の場合、確信度は低くてもアクティビティ実行回数を増やせば合格する可能性は高まる．期間だけでなく、期間中の実行時間の積算値も評価項目として情報を通知すれば、経験が増えるという意味で通知しない場合より確信度は向上する．コンカレントであれば実行回数が増加するので、その増加する度合いをケース間で比較し状況による情報の有効性の差異を検討する．

[実行時間]

実行時間を長くして、できるだけ確信度を向上させてから次に移行し、やり直し回数を減らすという戦略が考えられる．一般に、上流までさかのぼってしまう見直しは避けたいと考えられる．そのため、上流の実行時間を長くするバリエーションを設定する．さらに比較のために、下流の実行時間を長くするバリエーションも加える．R & D、A11、A12、A21、A22、A31 の各実行アクティビティの時定数 T を 7、3、10、10、14、21 とした．実行アクティビティの所要時間を T_{exe} とし、標準ケースを時定数 T と等しく、長くするケースを時定数 T の 2 倍にする．一次遅れの不確定性の減衰を想定しているため、標準ケースでは不確定な部分が 6 割減少し、実行時間が長いケースでは不確定部分が 9 割減少する．ここで、上記 6 つの実行アクティビティのバリエーションコードを 3 つの審査アクティビティの前後で、R & D から A12 までの 3 つと A21 から A31 までの 3 つを組にして、SSSSSS、LLLSSS、SSLLLL と表すことにする．S は標準実行時間、L は実行時間が長いケースを表し、S: $T_{exe} = T$ 、L: $T_{exe} = T * 2$ と設定する．それから、審査アクティビティ A13、A23、A32 の審査期間 T_{out} を 2、5、5 とした．

[審査閾値]

実際には顧客の評価の厳しさを調整することは難しいが、社内の審査も含めて、次のアクティビティへの移行の難易度を審査業務の確信度の閾値で表現し、バリエーションコードを HHH、LLH、LHL と表す．ここで A13、A23、A32 の 3 つの審査アクティビティでの審査の厳しさを以下の 2 通りの Y_{set} の値で表現することとし、H: $Y_{set} = 0.9$ 、L: $Y_{set} = 0.5$ と設定する．

HHH: 評価の閾値を高くして小さなフィードバックで確信度を向上させてから次のアクティビティに移行．これは、慎重に順に業務を進めていくパターンで、上流までの大きなフィードバックが発生しにくいように管理する場合に相当する．

LLH: 評価の閾値を低くして最下流の評価を早い時期から行う．

試作で一通り合格したものは簡単に得られても、品質管理等の管理のためのバリエーションチェックの段階をしっかりと経てから市場化する．最終段階のチェックで大きな

見直しが起こりうるかもしれないケースである。社内での審査が困難な製品であれば、審査しても確信度が低いので、最終的なチェックに依存するとすれば、このパターンに相当する。

LHL: 一つ利用できるものを見つけるのは大変だが、見つかったら周辺を実験するだけというのであれば評価の厳しさは2段目が高いことになる。まずは早く市場に出して操業しながら管理精度を高めていこうという戦略はこれに相当する。

[計算結果]

開発対象の差異、学習効果の有無、シーケンス/コンカレント、実行時間の長さ、審査の厳しさなど、それぞれの影響を基準のパターンから一つずつずらして感度解析を行うことが考えられるが、状況により戦略の有効性やそれぞれの条件の差異の影響が変化することが想定されるので、すべての変動の組み合わせについてシミュレーションを行うことにした。

全てのケースの組み合わせ($5 \times 2 \times 2 \times 3 \times 3$)180種類の計算結果をTable 5.1から5.3に示す。各試行では、一様乱数にて評価業務での合格判定を行い、条件毎に10000回試行した結果の期待値を算出した。

各表には、A32で合格となるまでの期間(開発期間)Term、並列に行われる業務の時間も積算した総業務実行時間CostTotal、終了時のA32からの出力の確信度 Y_{final} 、終了時のすべての実行業務の進展度の最小値MinXおよび最大値MaxX、すべての評価業務での不合格判定回数の総和SumIterNG、そして各業務の実行回数Iterの期待値が記されている。

Table 5.4に全体バリエーションでの平均、最小、最大、標準偏差の解析結果を示す。左端の列にAverageと表記している4行は、同じパターンで10000回計算した結果の平均値を対象に、180のバリエーションに対して平均、最小、最大、標準偏差を求めた結果である。

各バリエーションでの実行期間Termの平均値の期待値は341、標準偏差の期待値は242となっている。乱数で審査の合格、不合格を決定して開発期間の広がりを持たせているため分散が大きくなっていることがわかる。このシミュレーションでは、審査結果が合格になる確率を設定して計算したため、平均の値だけでなくばらつきの情報も得られる。

このばらつきが大きいという情報は、実際に1回試行したときの結果が得られても、広いばらつきの中の一点であると、評価できる。試行結果が短かったといっても、次も短くなるとは限らないと、実行結果に対する評価を行える。確信度は低くても、たまたま、うまくいくということも実際起こりえるので、このようなばらつきの情報も有効である。

Table 5.1 Simulation result (Part1)

Simulation Condition					Performance Index						Iter								
Case	学習	実行順	実行時間	閾値	Term	Cost Total	SumIter NG	Yfinal	MinX	MaxX	R&D	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32
C0	L	0110	LLLLSS	HHH	146	294	6	0.84	0.89	0.96	0	1	3	3	4	6	6	3	3
C0	L	0110	LLLLSS	LHL	74	192	3	0.72	0.78	0.95	0	1	2	2	4	4	4	1	1
C0	L	0110	LLLLSS	LLH	110	269	3	0.80	0.86	0.94	0	1	2	2	3	5	4	4	4
C0	L	0110	SSSLLL	HHH	184	431	7	0.89	0.90	0.96	1	4	8	8	4	4	4	2	2
C0	L	0110	SSSLLL	LHL	121	317	2	0.86	0.81	0.94	0	2	4	4	5	3	3	1	1
C0	L	0110	SSSLLL	LLH	152	438	2	0.86	0.80	0.94	0	2	4	4	5	4	4	3	3
C0	L	0110	SSSSSS	HHH	181	366	10	0.84	0.87	0.94	1	4	7	7	5	7	6	3	3
C0	L	0110	SSSSSS	LHL	91	252	4	0.70	0.78	0.89	1	2	4	4	6	6	5	1	1
C0	L	0110	SSSSSS	LLH	129	329	4	0.77	0.79	0.88	0	2	4	4	5	6	6	5	5
C0	L	1001	LLLLSS	HHH	253	253	6	0.83	0.88	0.94	0	1	2	2	3	5	5	3	3
C0	L	1001	LLLLSS	LHL	152	152	3	0.70	0.78	0.92	0	1	1	1	2	4	4	1	1
C0	L	1001	LLLLSS	LLH	223	223	3	0.77	0.83	0.92	0	1	1	1	2	3	3	4	4
C0	L	1001	SSSLLL	HHH	363	363	7	0.89	0.89	0.94	1	4	7	7	3	3	3	2	2
C0	L	1001	SSSLLL	LHL	277	277	2	0.85	0.79	0.92	0	2	3	3	3	3	3	1	1
C0	L	1001	SSSLLL	LLH	369	369	2	0.85	0.79	0.92	0	2	3	3	3	3	3	3	3
C0	L	1001	SSSSSS	HHH	324	324	11	0.82	0.85	0.92	1	4	6	6	4	6	6	3	3
C0	L	1001	SSSSSS	LHL	198	198	4	0.68	0.78	0.85	0	2	3	3	4	5	5	1	1
C0	L	1001	SSSSSS	LLH	279	279	4	0.73	0.78	0.84	0	2	3	3	3	4	4	5	5
C0	N	0110	LLLLSS	HHH	332	552	17	0.72	0.81	0.93	0	2	5	5	6	12	12	5	5
C0	N	0110	LLLLSS	LHL	107	244	5	0.63	0.74	0.91	0	1	2	2	4	7	6	1	1
C0	N	0110	LLLLSS	LLH	153	338	5	0.67	0.77	0.91	0	1	2	2	3	5	5	6	6
C0	N	0110	SSSLLL	HHH	484	1085	31	0.84	0.84	0.93	5	15	29	28	9	10	10	3	3
C0	N	0110	SSSLLL	LHL	161	404	4	0.82	0.74	0.91	0	2	6	6	6	5	5	1	1
C0	N	0110	SSSLLL	LLH	197	543	3	0.82	0.74	0.91	0	2	5	5	6	6	6	4	4
C0	N	0110	SSSSSS	HHH	471	799	32	0.72	0.79	0.89	3	10	20	20	9	15	15	5	5
C0	N	0110	SSSSSS	LHL	128	277	6	0.62	0.74	0.81	0	2	4	4	6	7	7	1	1
C0	N	0110	SSSSSS	LLH	178	377	5	0.65	0.74	0.80	0	1	3	3	5	7	6	6	6
C0	N	1001	LLLLSS	HHH	431	431	14	0.71	0.79	0.92	0	1	3	3	4	9	9	5	5
C0	N	1001	LLLLSS	LHL	183	183	5	0.63	0.74	0.91	0	1	1	1	2	6	6	1	1
C0	N	1001	LLLLSS	LLH	266	266	5	0.67	0.75	0.91	0	1	1	1	2	3	3	6	6
C0	N	1001	SSSLLL	HHH	956	956	28	0.84	0.84	0.92	5	15	26	26	7	8	8	3	3
C0	N	1001	SSSLLL	LHL	319	319	3	0.81	0.74	0.91	0	2	4	4	4	4	4	1	1
C0	N	1001	SSSLLL	LLH	433	433	3	0.81	0.74	0.91	0	2	4	4	4	4	4	4	4
C0	N	1001	SSSSSS	HHH	624	624	25	0.70	0.77	0.86	1	8	13	13	7	12	12	5	5
C0	N	1001	SSSSSS	LHL	237	237	5	0.61	0.74	0.79	0	2	3	3	5	6	6	1	1
C0	N	1001	SSSSSS	LLH	324	324	5	0.64	0.74	0.78	0	1	2	2	3	5	5	6	6
C1	L	0110	LLLLSS	HHH	321	519	16	0.73	0.84	0.95	0	2	5	5	6	11	11	5	5
C1	L	0110	LLLLSS	LHL	131	278	6	0.59	0.73	0.92	0	1	2	2	5	8	7	1	1
C1	L	0110	LLLLSS	LLH	173	367	6	0.64	0.77	0.92	0	1	2	2	3	6	6	7	7
C1	L	0110	SSSLLL	HHH	435	860	22	0.83	0.86	0.95	3	10	19	19	7	9	9	3	3
C1	L	0110	SSSLLL	LHL	199	501	6	0.73	0.72	0.92	0	4	8	8	7	6	6	1	1
C1	L	0110	SSSLLL	LLH	253	709	5	0.73	0.72	0.92	0	3	7	7	7	7	7	5	5
C1	L	0110	SSSSSS	HHH	409	681	26	0.72	0.79	0.92	2	8	16	16	8	13	13	5	5
C1	L	0110	SSSSSS	LHL	188	379	9	0.56	0.72	0.86	0	3	6	6	8	10	9	1	1
C1	L	0110	SSSSSS	LLH	245	459	8	0.60	0.72	0.84	0	2	4	4	6	8	8	7	7
C1	L	1001	LLLLSS	HHH	440	440	14	0.70	0.81	0.93	0	1	4	4	4	9	9	6	6
C1	L	1001	LLLLSS	LHL	210	210	6	0.57	0.73	0.90	0	1	1	1	3	6	6	1	1
C1	L	1001	LLLLSS	LLH	315	315	6	0.62	0.75	0.90	0	1	1	1	2	5	5	7	7
C1	L	1001	SSSLLL	HHH	746	746	20	0.81	0.82	0.94	2	9	15	15	5	7	7	4	4
C1	L	1001	SSSLLL	LHL	428	428	5	0.71	0.72	0.90	0	3	6	6	6	6	6	1	1
C1	L	1001	SSSLLL	LLH	612	612	5	0.71	0.72	0.90	0	3	6	6	5	5	5	5	5
C1	L	1001	SSSSSS	HHH	575	575	23	0.69	0.75	0.89	1	7	11	11	6	11	11	6	6
C1	L	1001	SSSSSS	LHL	309	309	8	0.54	0.72	0.83	0	2	4	4	6	8	8	2	2
C1	L	1001	SSSSSS	LLH	438	438	9	0.58	0.72	0.82	0	2	4	4	5	7	7	8	8
C1	N	0110	LLLLSS	HHH	544	853	31	0.56	0.72	0.91	0	1	8	8	7	21	21	8	8
C1	N	0110	LLLLSS	LHL	271	441	14	0.48	0.68	0.88	0	1	2	2	5	15	15	2	2
C1	N	0110	LLLLSS	LLH	261	461	11	0.50	0.69	0.88	0	1	2	2	3	7	7	9	9
C1	N	0110	SSSLLL	HHH	1129	2046	72	0.73	0.76	0.92	7	33	63	63	14	19	19	5	5
C1	N	0110	SSSLLL	LHL	251	599	10	0.65	0.67	0.88	0	3	11	11	8	8	8	1	1
C1	N	0110	SSSLLL	LLH	302	856	9	0.65	0.67	0.88	0	3	11	11	8	8	8	6	6
C1	N	0110	SSSSSS	HHH	838	1110	50	0.53	0.68	0.84	1	11	26	26	11	22	22	9	9
C1	N	0110	SSSSSS	LHL	419	637	21	0.46	0.67	0.78	0	2	8	8	12	18	18	3	3
C1	N	0110	SSSSSS	LLH	487	681	20	0.47	0.67	0.76	0	1	7	7	8	14	14	10	10
C1	N	1001	LLLLSS	HHH	630	630	23	0.53	0.70	0.90	0	1	4	4	4	14	14	9	9
C1	N	1001	LLLLSS	LHL	286	286	9	0.47	0.67	0.88	0	1	1	1	2	9	9	3	3
C1	N	1001	LLLLSS	LLH	396	396	11	0.49	0.67	0.88	0	1	1	1	1	6	6	10	10
C1	N	1001	SSSLLL	HHH	1658	1658	59	0.72	0.73	0.90	5	28	51	51	11	14	14	5	5
C1	N	1001	SSSLLL	LHL	548	548	10	0.65	0.67	0.88	0	3	11	11	7	7	7	1	1
C1	N	1001	SSSLLL	LLH	757	757	9	0.65	0.67	0.88	0	3	10	10	6	6	6	6	6
C1	N	1001	SSSSSS	HHH	1002	1002	44	0.52	0.67	0.82	0	9	20	20	11	20	20	9	9
C1	N	1001	SSSSSS	LHL	481	481	17	0.44	0.67	0.75	0	1	6	6	8	13	13	3	3
C1	N	1001	SSSSSS	LLH	651	651	20	0.47	0.67	0.75	0	1	6	6	7	13	13	10	10

Table 5.2 Simulation result (Part2)

Simulation Condition					Performance Index					Iter									
Case	学習	実行順	実行 時間	閾値	Term	Cost Total	Sumiter NG	Yfinal	MinX	MaxX	R&D	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32
C2	L	0110	LLLLSS	HHH	102	229	3	0.88	0.89	0.96	0	1	2	2	3	4	4	2	2
C2	L	0110	LLLLSS	LHL	60	167	1	0.69	0.72	0.95	0	1	2	2	3	3	3	1	1
C2	L	0110	LLLLSS	LLH	84	216	2	0.85	0.87	0.95	0	1	2	2	3	4	3	3	3
C2	L	0110	SSSLLL	HHH	131	324	4	0.91	0.91	0.96	1	3	5	5	4	3	3	2	2
C2	L	0110	SSSLLL	LHL	97	253	1	0.88	0.80	0.95	0	2	3	3	4	3	3	1	1
C2	L	0110	SSSLLL	LLH	129	373	1	0.88	0.82	0.95	1	2	4	4	5	4	4	2	2
C2	L	0110	SSSSSS	HHH	114	263	5	0.87	0.88	0.96	1	3	5	5	4	5	4	2	2
C2	L	0110	SSSSSS	LHL	69	206	2	0.69	0.72	0.91	1	2	3	3	5	5	4	1	1
C2	L	0110	SSSSSS	LLH	97	281	2	0.83	0.81	0.89	1	2	3	3	5	5	5	3	3
C2	L	1001	LLLLSS	HHH	188	188	4	0.86	0.88	0.94	0	1	2	2	2	3	3	2	2
C2	L	1001	LLLLSS	LHL	134	134	2	0.68	0.72	0.91	0	1	1	1	2	3	3	1	1
C2	L	1001	LLLLSS	LLH	187	187	2	0.82	0.84	0.91	0	1	1	1	2	3	3	3	3
C2	L	1001	SSSLLL	HHH	251	251	4	0.90	0.90	0.94	1	3	4	4	2	2	2	2	2
C2	L	1001	SSSLLL	LHL	240	240	2	0.86	0.79	0.90	0	2	3	3	3	3	3	1	1
C2	L	1001	SSSLLL	LLH	318	318	2	0.87	0.78	0.90	0	2	3	3	3	3	3	3	3
C2	L	1001	SSSSSS	HHH	217	217	6	0.86	0.87	0.92	1	3	4	4	3	4	4	2	2
C2	L	1001	SSSSSS	LHL	176	176	3	0.67	0.72	0.85	0	2	3	3	3	4	4	1	1
C2	L	1001	SSSSSS	LLH	246	246	3	0.78	0.77	0.84	0	2	2	2	3	4	4	4	4
C2	N	0110	LLLLSS	HHH	281	492	13	0.76	0.80	0.93	0	2	5	5	6	10	10	4	4
C2	N	0110	LLLLSS	LHL	110	311	5	0.61	0.67	0.82	0	2	4	4	6	7	6	1	1
C2	N	0110	LLLLSS	LLH	145	330	4	0.71	0.76	0.90	0	1	2	2	4	5	5	5	5
C2	N	0110	SSSLLL	HHH	322	779	19	0.86	0.86	0.93	4	10	18	18	6	7	7	3	3
C2	N	0110	SSSLLL	LHL	143	379	3	0.84	0.71	0.90	1	3	5	5	6	4	4	1	1
C2	N	0110	SSSLLL	LLH	182	537	2	0.84	0.70	0.90	1	2	5	5	6	6	5	3	3
C2	N	0110	SSSSSS	HHH	330	673	24	0.76	0.80	0.91	4	9	17	17	8	12	12	4	4
C2	N	0110	SSSSSS	LHL	111	265	5	0.61	0.67	0.82	0	2	4	4	6	7	6	1	1
C2	N	0110	SSSSSS	LLH	152	352	5	0.70	0.68	0.80	0	2	3	3	5	6	6	6	6
C2	N	1001	LLLLSS	HHH	416	416	12	0.75	0.79	0.91	0	2	3	3	5	8	8	5	5
C2	N	1001	LLLLSS	LHL	185	185	4	0.61	0.67	0.88	0	1	1	1	3	5	5	1	1
C2	N	1001	LLLLSS	LLH	266	266	5	0.70	0.74	0.88	0	1	1	1	2	4	4	6	6
C2	N	1001	SSSLLL	HHH	703	703	18	0.86	0.86	0.91	4	10	16	16	5	6	6	3	3
C2	N	1001	SSSLLL	LHL	294	294	3	0.83	0.69	0.88	0	2	4	4	4	4	4	1	1
C2	N	1001	SSSLLL	LLH	394	394	2	0.83	0.69	0.88	0	2	3	3	3	3	3	3	3
C2	N	1001	SSSSSS	HHH	553	553	20	0.75	0.78	0.87	3	8	12	12	6	10	10	5	5
C2	N	1001	SSSSSS	LHL	226	226	5	0.61	0.67	0.76	0	2	3	3	4	6	6	1	1
C2	N	1001	SSSSSS	LLH	311	311	5	0.67	0.68	0.75	0	2	3	3	3	5	5	6	6
C3	L	0110	LLLLSS	HHH	435	763	22	0.72	0.76	0.87	3	6	11	11	7	12	12	5	5
C3	L	0110	LLLLSS	LHL	178	388	8	0.53	0.58	0.79	1	2	4	4	7	9	9	2	2
C3	L	0110	LLLLSS	LLH	205	422	7	0.64	0.68	0.77	0	1	2	2	5	7	7	7	7
C3	L	0110	SSSLLL	HHH	500	985	25	0.78	0.82	0.89	5	11	19	19	7	10	10	4	4
C3	L	0110	SSSLLL	LHL	213	575	7	0.65	0.65	0.77	2	5	10	10	8	7	7	1	1
C3	L	0110	SSSLLL	LLH	301	901	6	0.67	0.64	0.76	2	5	9	9	10	9	9	6	6
C3	L	0110	SSSSSS	HHH	398	745	28	0.72	0.76	0.88	5	11	18	18	8	13	13	5	5
C3	L	0110	SSSSSS	LHL	204	509	11	0.52	0.57	0.75	2	5	9	9	11	12	11	2	2
C3	L	0110	SSSSSS	LLH	232	569	9	0.61	0.61	0.70	1	4	7	7	9	10	10	7	7
C3	L	1001	LLLLSS	HHH	611	611	19	0.70	0.74	0.83	2	5	8	8	6	10	10	6	6
C3	L	1001	LLLLSS	LHL	283	283	7	0.52	0.58	0.74	0	2	2	2	5	7	7	2	2
C3	L	1001	LLLLSS	LLH	381	381	7	0.61	0.67	0.73	0	1	2	2	4	6	6	7	7
C3	L	1001	SSSLLL	HHH	836	836	22	0.77	0.79	0.85	4	10	15	15	6	8	8	4	4
C3	L	1001	SSSLLL	LHL	477	477	7	0.64	0.62	0.73	1	5	7	7	6	6	6	1	1
C3	L	1001	SSSLLL	LLH	710	710	7	0.65	0.62	0.73	1	5	7	7	6	6	6	6	6
C3	L	1001	SSSSSS	HHH	621	621	24	0.70	0.73	0.81	3	9	13	13	6	11	11	6	6
C3	L	1001	SSSSSS	LHL	355	355	9	0.51	0.57	0.68	1	4	6	6	6	8	8	2	2
C3	L	1001	SSSSSS	LLH	472	472	9	0.58	0.58	0.67	1	4	5	5	6	7	7	8	8
C3	N	0110	LLLLSS	HHH	925	1354	45	0.53	0.59	0.78	3	11	21	21	12	22	22	9	9
C3	N	0110	LLLLSS	LHL	381	605	18	0.44	0.51	0.70	0	2	3	3	11	18	17	3	3
C3	N	0110	LLLLSS	LLH	396	596	14	0.49	0.56	0.69	0	1	2	2	7	12	12	10	10
C3	N	0110	SSSLLL	HHH	1168	2245	75	0.66	0.70	0.81	15	35	62	62	15	21	21	6	6
C3	N	0110	SSSLLL	LHL	279	727	14	0.59	0.51	0.69	2	8	16	16	9	8	8	1	1
C3	N	0110	SSSLLL	LLH	365	1140	14	0.59	0.51	0.69	2	8	16	16	11	10	10	7	7
C3	N	0110	SSSSSS	HHH	980	1712	77	0.54	0.60	0.77	12	30	53	53	15	27	27	9	9
C3	N	0110	SSSSSS	LHL	510	1022	31	0.44	0.50	0.63	3	10	19	19	19	24	24	3	3
C3	N	0110	SSSSSS	LLH	484	877	24	0.48	0.50	0.60	2	7	14	14	11	16	16	10	10
C3	N	1001	LLLLSS	HHH	998	998	34	0.53	0.59	0.73	1	6	10	10	10	20	20	9	9
C3	N	1001	LLLLSS	LHL	420	420	13	0.43	0.50	0.67	0	1	1	1	6	12	12	3	3
C3	N	1001	LLLLSS	LLH	550	550	15	0.48	0.55	0.67	0	1	1	1	6	11	11	10	10
C3	N	1001	SSSLLL	HHH	1728	1728	57	0.65	0.68	0.76	11	28	44	44	11	16	16	6	6
C3	N	1001	SSSLLL	LHL	661	661	14	0.59	0.51	0.67	2	9	15	15	7	8	8	1	1
C3	N	1001	SSSLLL	LLH	935	935	14	0.59	0.51	0.67	2	9	14	14	7	7	7	7	7
C3	N	1001	SSSSSS	HHH	1229	1229	53	0.52	0.57	0.68	7	18	30	30	12	22	22	9	9
C3	N	1001	SSSSSS	LHL	629	629	22	0.43	0.48	0.58	2	7	12	12	9	14	14	3	3
C3	N	1001	SSSSSS	LLH	775	775	24	0.47	0.49	0.58	1	7	12	12	9	13	13	10	10

Table 5.3 Simulation result (Part3)

Simulation Condition					Performance Index						Iter								
Case	学習	実行順	実行時間	閾値	Term	Cost Total	SumIter NG	Yfinal	MinX	MaxX	R&D	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32
C4	L	0110	LLLLSS	HHH	113	247	4	0.86	0.91	0.96	0	1	2	2	3	5	5	3	3
C4	L	0110	LLLLSS	LHL	65	174	2	0.79	0.84	0.96	0	1	2	2	3	4	3	1	1
C4	L	0110	LLLLSS	LLH	91	232	2	0.84	0.89	0.96	0	1	2	2	3	4	4	3	3
C4	L	0110	SSSLLL	HHH	137	343	5	0.91	0.90	0.96	1	3	6	6	4	3	3	1	1
C4	L	0110	SSSLLL	LHL	101	255	1	0.90	0.85	0.96	0	1	3	3	4	3	3	1	1
C4	L	0110	SSSLLL	LLH	112	299	1	0.90	0.85	0.96	0	1	3	3	4	3	3	2	2
C4	L	0110	SSSSSS	HHH	146	303	8	0.86	0.89	0.95	1	3	6	6	4	6	5	3	3
C4	L	0110	SSSSSS	LHL	77	214	3	0.77	0.84	0.92	0	2	3	3	5	5	4	1	1
C4	L	0110	SSSSSS	LLH	108	273	3	0.82	0.85	0.91	0	1	3	3	4	5	5	4	4
C4	L	1001	LLLLSS	HHH	200	200	4	0.85	0.90	0.95	0	1	1	1	2	4	4	3	3
C4	L	1001	LLLLSS	LHL	134	134	2	0.77	0.84	0.95	0	1	1	1	2	3	3	1	1
C4	L	1001	LLLLSS	LLH	188	188	3	0.82	0.86	0.95	0	1	1	1	2	3	3	4	4
C4	L	1001	SSSLLL	HHH	277	277	5	0.90	0.90	0.95	1	4	5	5	2	2	2	2	2
C4	L	1001	SSSLLL	LHL	212	212	1	0.89	0.84	0.95	0	2	2	2	2	2	2	1	1
C4	L	1001	SSSLLL	LLH	241	241	1	0.89	0.84	0.95	0	1	2	2	2	2	2	2	2
C4	L	1001	SSSSSS	HHH	265	265	8	0.85	0.87	0.93	1	3	5	5	3	5	5	3	3
C4	L	1001	SSSSSS	LHL	168	168	3	0.76	0.84	0.89	0	2	2	2	3	4	4	1	1
C4	L	1001	SSSSSS	LLH	229	229	3	0.79	0.84	0.88	0	1	2	2	3	3	3	4	4
C4	N	0110	LLLLSS	HHH	246	436	12	0.78	0.85	0.95	0	1	3	3	5	11	10	4	4
C4	N	0110	LLLLSS	LHL	92	217	4	0.72	0.82	0.94	0	1	2	2	4	6	5	1	1
C4	N	0110	LLLLSS	LLH	127	292	4	0.75	0.83	0.94	0	1	2	2	3	5	5	5	5
C4	N	0110	SSSLLL	HHH	342	815	21	0.87	0.86	0.94	3	11	21	21	7	8	8	3	3
C4	N	0110	SSSLLL	LHL	142	355	3	0.86	0.82	0.94	0	2	5	5	5	4	4	1	1
C4	N	0110	SSSLLL	LLH	162	444	2	0.86	0.82	0.94	0	2	4	4	5	5	5	3	3
C4	N	0110	SSSSSS	HHH	356	595	22	0.77	0.83	0.90	1	7	14	14	7	11	11	4	4
C4	N	0110	SSSSSS	LHL	107	240	5	0.71	0.82	0.86	0	1	3	3	5	6	6	1	1
C4	N	0110	SSSSSS	LLH	143	311	4	0.73	0.82	0.86	0	1	3	3	4	6	5	5	5
C4	N	1001	LLLLSS	HHH	330	330	10	0.77	0.84	0.94	0	1	2	2	3	7	7	4	4
C4	N	1001	LLLLSS	LHL	158	158	4	0.72	0.82	0.93	0	1	1	1	2	5	5	1	1
C4	N	1001	LLLLSS	LLH	216	216	4	0.74	0.82	0.93	0	1	1	1	1	3	3	5	5
C4	N	1001	SSSLLL	HHH	749	749	20	0.88	0.86	0.94	3	12	20	20	6	6	6	3	3
C4	N	1001	SSSLLL	LHL	267	267	2	0.86	0.82	0.93	0	2	3	3	3	3	3	1	1
C4	N	1001	SSSLLL	LLH	344	344	2	0.86	0.82	0.93	0	1	3	3	3	3	3	3	3
C4	N	1001	SSSSSS	HHH	483	483	18	0.76	0.82	0.89	1	5	10	10	5	9	9	5	5
C4	N	1001	SSSSSS	LHL	190	190	4	0.70	0.82	0.84	0	1	2	2	4	5	5	1	1
C4	N	1001	SSSSSS	LLH	257	257	4	0.72	0.82	0.84	0	1	2	2	3	4	4	5	5

Table 5.4 Average, minimum, maximum and standard deviation of simulation result

		Performance Index						Iter									
		Term	Cost Total	SumIter NG	Yfinal	MinX	MaxX	R&D	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32	
Average	Mean	341	495	12	0.70	0.75	0.86	1	4	8	8	6	8	8	4	4	
	Min	60	134	1	0.43	0.48	0.58	0	1	1	1	1	2	2	1	1	
	Max	1728	2245	77	0.91	0.91	0.96	15	35	63	63	19	27	27	10	10	
	Std	271	341	14	0.13	0.10	0.09	2	6	10	10	3	5	5	3	3	
Min	Mean	69	110	0	0.59	0.67	0.79	0	1	2	2	1	2	2	1	1	
	Min	45	70	0	0.37	0.45	0.45	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Max	115	205	2	0.86	0.82	0.94	0	1	3	3	3	3	2	1	1	
	Std	24	33	0	0.16	0.12	0.13	0	0	1	1	1	1	0	0	0	
Max	Mean	1985	10434	63	0.83	0.85	0.93	7	19	35	35	34	45	45	25	25	
	Min	301	692	17	0.52	0.58	0.76	0	1	1	1	9	17	17	1	1	
	Max	6469	38160	223	0.96	0.96	0.99	33	72	134	134	99	107	107	87	87	
	Std	1299	7777	49	0.11	0.09	0.05	7	17	31	31	17	23	23	20	20	
Std	Mean	242	1203	9	0.05	0.04	0.03	1	3	5	5	4	6	6	3	3	
	Min	32	75	2	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	1	2	2	0	0	
	Max	832	4968	35	0.13	0.11	0.08	6	13	24	24	16	17	17	9	9	
	Std	168	1014	7	0.03	0.03	0.02	1	3	5	5	2	3	3	2	2	

Table 5.5 から Table 5.13 にシミュレーション条件分類毎の結果を示す。Table 5.5、5.6、5.8、5.10、5.12 は他の分類の差異は考慮せず、180 バリエーションをその注目する特性のみで区別したものである。各バリエーションに対して 10000 回の試行の平均値を算出し、その 180 個の平均値をグループに分けて、180 バリエーションでの平均値を算出している。

[開発対象の難しさの影響]

Table 5.5 Average of each execution activity variation

Performance Index							Iter								
	Term	Cost Total	SumIter NG	Yfinal	MinX	MaxX	R&D	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32
C0	257	384	8	0.75	0.79	0.90	1	3	6	6	5	6	6	3	3
C1	474	640	18	0.60	0.72	0.87	1	5	10	10	7	11	11	5	5
C2	210	328	6	0.78	0.77	0.89	1	3	5	5	4	5	5	3	3
C3	563	815	23	0.58	0.60	0.73	3	9	15	15	9	13	13	6	6
C4	202	307	6	0.81	0.84	0.92	0	2	4	4	4	5	5	3	3

Table 5.5 は、開発対象のバリエーションの違いで Table 5.1 から Table 5.3 の 180 データを集計したものである。前述のように C1 と C3 は開発が難しいという想定でパラメータを設定したが、その結果 Term、CostTotal の値が大きくなるという形で難しさが現れている。

[学習効果の有無の影響]

Table 5.6 Average of each learning effect case

Performance Index							Iter								
	Term	Cost Total	SumIter NG	Yfinal	MinX	MaxX	R&D	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32
L	257	370	7	0.75	0.79	0.89	1	3	5	5	4	6	6	3	3
N	446	609	17	0.66	0.71	0.84	1	5	10	10	6	10	10	5	5

Table 5.6 は、新製品の開発に前回の知見が活用でき、学習効果があるかないかを考慮することでシミュレーション結果がどのように異なるかを、開発業務の難しさや戦略が異なるものもすべて含めて学習効果の有無別で平均を計算したものである。学習効果あり(L)が、学習効果なし(N)より Term、CostTotal の値が小さく、新製品の新規性（既製品の知見の活用の可能性）を開発能力の評価に考慮しておく必要があるということが理解できる。さらに、Table 5.1 から Table 5.3 を見ると、学習効果はすべての場合で認められ、学習が悪いというシミュレーション結果は得られていない。しかし、もともと確信度の初期値が低い C4 では効果が小さくなっていることが、Table 5.7(Table 5.1、5.2、5.3 から抽出)からわかる。

Table 5.7 Comparison of learning effect

Case	学習	実行順	実行時間	閾値	Term	Cost Total	SumIter NG
C1	L	1001	SSSSSS	LHL	309	309	8
C1	N	1001	SSSSSS	LHL	481	481	17
C2	L	1001	SSSSSS	LHL	176	176	3
C2	N	1001	SSSSSS	LHL	226	226	5
C3	L	1001	SSSSSS	LHL	355	355	9
C3	N	1001	SSSSSS	LHL	629	629	22
C4	L	1001	SSSSSS	LHL	168	168	3
C4	N	1001	SSSSSS	LHL	190	190	4

学習することが成功体験として思い込みになり、実際に検討すべき課題に気づかず、必要な検討を始めるまでに時間がかかってしまうという悪い影響も考えられなくないが、それはシミュレーションにおいて、確信度が低いのに高い初期値を設定して計算を実施した結果に相当する。開発に関係する各部門の担当者がこのモデルのパラメータの設定を協力して検討すれば、このような思い込みの有無も避けられる可能性が高くなると期待できる。

[シーケンシャル/コンカレントの違いの効果]

Table 5.8 Average of each execution order

Performance Index							Iter								
	Term	Cost Total	SumIter NG	Yfinal	MinX	MaxX	R&D	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32
0110	264	539	13	0.72	0.75	0.88	1	4	9	9	6	9	8	4	4
1001	440	440	11	0.70	0.74	0.85	1	4	7	7	4	7	7	4	4

Table 5.8 は、開発をシーケンシャルに行うこととコンカレントに行うことの違いを、開発業務の難しさや戦略が異なるものもすべて含めて、平均を計算したものを比較する表である。

0110 がコンカレントで、1001 がシーケンシャルであるが、コンカレントの方が、開発期間 Term は短くなっているが積算実行時間は長くなっていることがわかる。さらに Table 5.1 から Table 5.3 を見て、実行期間 Term に対するシーケンスかコンカレントの違いの感度が他の分類の差異によりいかに異なるかを検討した。

多くの場合は期間短縮には有効であるが、Table 5.9(Table 5.1、5.2、5.3 から抽出)に示すように期間はあまり短縮されず有効でないケースも見受けられる。

Table 5.9 Irregular case of execution order effect

Case	学習	実行順	実行 時間	閾値	Term	Cost Total	SumIter NG
C1	N	0110	LLLSSS	LHL	271	441	14
C1	N	1001	LLLSSS	LHL	286	286	9

初期の知見が乏しいときにはコンカレントエンジニアリングが有効とは限らないものの、多くの場合は有効である。しかしその有効性は状況によって異なるため、シミュレーションにて検討することが有用であると考えられる。

[実行時間の延長による確信度向上の効果]

Table 5.10 Average of each execution time pattern

Performance Index							Iter								
	Term	Cost Total	SumIter NG	Yfinal	MinX	MaxX	R&D	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32
SSSSSS	329	493	15	0.66	0.73	0.83	1	5	9	9	7	10	9	4	4
LLLSSS	271	365	9	0.68	0.75	0.89	0	2	3	3	4	7	7	4	4
SSSLLL	430	627	12	0.79	0.76	0.89	2	6	12	12	6	6	6	3	3

Table 5.10 は、確信度を向上させるためにアクティビティの実行時間を長くすることの効果を示す。R&D, A11, A12 のアクティビティ実行時間を長くする LLLSSS は、標準の SSSSSS よりも開発期間 Term も積算実行時間 CostTotal も短くなっているが、A21, A22, A31 の実行時間を長くする SSSLLL は、開発期間、積算実行時間とも長くなっている。上流のアクティビティの確信度を向上させることは、下流から上流までの大きなやり直しを防ぐ効果があり、やり直し回数 SumIterNG の回数が減っていることがわかる。下流の確信度を上げる SSSLLL は、A21, A22, A23, A31, A32 の Iter の数値が SSSSSS よりも減っていることから、後半のアクティビティのやり直し回数は減っているが、後半のアクティビティの時定数は前半よりも長く設定されていることもあり、確信度を向上させるために実行時間をさらに延ばすことは、全体の期間をのばす方向に作用している。上流アクティビティの確信度を高めることの重要性がこの表より理解できる。しかし、Table 5.11 (Table 5.1、5.2、5.3 から抽出) に示すように下流アクティビティの確信度向上が有効なケースもある。

Table 5.11 Irregular case of execution time pattern effect

Case	学習	実行順	実行時間	閾値	Term	Cost Total	SumIter NG
C3	N	0110	LLLSSS	LHL	381	605	18
C3	N	0110	SSSLLL	LHL	279	727	14
C3	N	0110	SSSSSS	LHL	510	1022	31

本戦略の有効性は定性的に理解でき計算結果もその傾向を正しく表わしているが、その戦略の効果はケース毎に異なり、その変化の度合いを予測することは容易ではないので、シミュレーションにより検討することの有効性が理解できる。

[審査の厳しさの影響]

Table 5.12 Average of each evaluation severity pattern

Performance Index							Iter								
	Term	Cost Total	SumIter NG	Yfinal	MinX	MaxX	R&D	A11	A12	A13	A21	A22	A23	A31	A32
HHH	505	697	23	0.76	0.80	0.90	2	8	15	15	7	11	11	5	5
LHL	226	346	7	0.66	0.71	0.85	0	2	5	5	6	7	7	1	1
LLH	293	441	7	0.70	0.73	0.84	0	2	4	4	5	6	6	6	6

Table 5.12 は、審査の厳しさの違いの影響を示すものである。すべて厳しく審査する HHH に比べて、上流アクティビティで確信度を向上できないまま下流に移行する LLH、現場での試作品が得られる段階の審査だけを厳しくして、実操業しながら製造条件のばらつきの対応を検討して確信度を上げようという LHL の比較であるが、期間の平均値は、HHH、LHL、LLH でそれぞれ 505、226、293 となった。「A3：フレキシビリティの探索業務」が基準であり、21 日間と最も長い日数のアクティビティであるため、このアクティビティの審査を甘くすることが効果的であったと考えられる。

LLH では、最後の審査で低い確信度のアクティビティの見直しが発生するので、上流までの大きなやり直しループが発生する恐れがあるが、上流の審査が甘く上流でのやり直しが発生しないため、全体としてやり直し回数が少なく開発期間の短縮につながっていることがわかる。審査が厳しくなるとやり直しが増えるが、通過する出力の確信度は高くなっているので、下流に移行すれば、やり直しが発生しにくくなることが数値結果でも確認できる。初期の確信度が低い学習効果が期待できる場合は上流の審査を甘くして下流側に進めた方が有効であるが、逆に初期の確信度が高い場合には、Table 5.13(Table 5.1、5.2、5.3 から抽出)に示すように悪化するケースもあるので、一概に上流審査を甘くすることが良い戦略とは言えない。

Table 5.13 Irregular case of severity pattern effect

Case	学習	実行順	実行時間	閾値	Term	Cost Total	SumIter NG
C0	L	1001	SSSLLL	HHH	363	363	7
C0	L	1001	SSSLLL	LHL	277	277	2
C0	L	1001	SSSLLL	LLH	369	369	2
C2	L	1001	SSSLLL	HHH	251	251	4
C2	L	1001	SSSLLL	LHL	240	240	2
C2	L	1001	SSSLLL	LLH	318	318	2

〔状況の差異による戦略やケースの差異に対する感度の違いについて〕

以上の結果から、同じ戦略でも、その効果は状況により大きく変化し、その感度の違いの予測は容易ではなく、シミュレーションにより検討することの有効性が理解できる。

5.7 結 言

製品のライフサイクルが短くなってきているだけでなく、顧客からの受注設計の割合が高くなり、多種多様な製品を迅速に供給していくことが求められる時代になってきている。このような背景の中、レシピ設計業務に関するモデルが存在していなかったために、現状業務の問題点が指摘されてきたにも関わらず、システムティックに取り組まれていなかった。また、一般に業務個別の確信度は評価しやすいが、複数の業務トータルでの確信度を評価するのは難しい。レシピ設計のような開発をマネジメントする場合は、確信度を向上させる上で注力すべき、もしくは投資すべき業務が何であるかといった意思決定支援ツールがあると有効であると考えられる。そのようなツールがあれば次のような状況を回避することが可能となる。

- ・ トータルの確信度向上に寄与しない業務に注力する
- ・ ある程度検討した段階で他業務に引渡しその結果をフィードバックした方が効率的であるのに自業務を引きずってしまう
- ・ 複数業務を情報交換しながらコンカレントに実施した方が効率的であるのに、ウォーターフォール方式に取り進めてしまう

そこで本章では、システマティックに業務改善に取り組むことができるように、I D E F 0にてレシピ設計の業務プロセスモデルを提案した。そして、業務内容の確からしさの指標としての確信度を定義した。さらに、この確信度を利用して設計課題毎の現状レベルを個々に評価し、シミュレーションによって総合力を評価することで、管理者が効率的にレシピ設計業務を取り進めることのできる意思決定支援手法を提案した。

従来の手法(D C O R、MS Project)は、対象ジョブをいかに早く完了させるかという観点であるのに対し、本提案の手法は今回の設計のことだけを考えるのではなく、今回の経験を次回以降の設計にも活用できるように根拠のあるレシピにブラッシュアップしていくことを主眼に置いている。そのため、組織力を向上させるツールにもなると考えられる。

今後の展開として、個々の業務における不確定要素の把握および能力評価手法の検討、確信度を向上させるためのデータベースの検討、設計課題ごとのベストプラクティスの提示等を実施していくとともに、他の開発業務への適用も考えていきたい。

Nomenclature

	= contribution of input information about the certainty of an activity	[-]
β	= damping ratio of the certainty of an activity	[-]
ϕ	= division ratio between the initial certainty and final certainty at the previous activity execution	[-]
	= parameter of easiness passing inspection	[-]
k	= the number of activity execution times	[-]
T	= time constant of achieving target progress index	[-]
T_{exe}	= execution time of an activity	[-]
T_{out}	= period time of the inspection	[-]
U	= certainty of output information of inspection activity	[-]
$U_{N,j}^{\min}(k)$	= minimum certainty of input information of design N , activity j	[-]
$X_{N,j}(k)$	= progress index of achieving target certainty of design N , activity j , execution k	[-]
$X_{N,j,0}(k)$	= initial value of progress index of achieving target certainty of design N , activity j , execution k	[-]
$Y_{N,j}(k)$	= certainty of an activity of design N , activity j , execution k	[-]
Y_{set}	= target certainty of an activity	[-]
Z	= probability of rejection for an inspection	[-]

参考文献

- 1) <http://www.supply-chain.gr.jp>
- 2) ANSI/ISA-S88.01; "Batch Control, Part1; Models and Terminology", ANSI/ISA-S88.01; 27-43 (1995)

第6章

結論

本研究ではまず、第1章にてバッチプロセスを対象に産業界で抱えている現状の課題を整理した。その結果、バッチプロセスにおける様々な課題は、マーケット、原料特性、製造環境、顧客要求品質等に内在する不確定要素に起因することが多いということがわかった。この点を踏まえた上で、生産に関わる業務毎に不確定要素への対応手法について検討し提案を行った。

第2章では、生産計画/スケジューリング業務という切り口で、不確定要素への対応手法に関する提案を行った。

生産計画/スケジューリング業務は、製品毎の製造所要時間、製造量、品質が予定通り実現されるという前提で行われているため、この前提から外れるとスケジュールの見直しを実施しなければならないだけでなく、製造の現場作業、原材料の手配、出荷、品質検査等の段取りに影響を与え、工場の操業そのものを混乱させることになる。

そこで、工程進捗遅延を吸収するという切り口でバッチ間のバッファ時間に着目した。従来、バッファ時間は経験的に設定されており根拠が明確になっていないケースが多かったが、本研究では、

- ・ 製造実績をバッファ時間設定に反映させる
- ・ 遅延が発生した場合は元のスケジュールに戻すことを考える
- ・ 戦略的にバッファ時間を設定できるようにする

ということを検討して、システムティックにバッファ時間を設定する手法を開発した。

実プロセスでは、冷熱媒の変更や現場作業の効率化、ろ過フィルタの交換等により所要時間を短縮できる。そこで、工程進捗が遅延した際、元のスケジュールに戻すというコントロールの概念を組み込むために、製品別工程毎に短縮可能時間を設定することを考えた。

戦略としては、生産機会重視、コスト重視、ヒューマンエラー防止重視の3つを設定し、共通的に元に戻すまでのバッチ数を与えることとした。ここで、バッファ時間設定に使用する情報としては、以下の情報があらかじめ与えられるとした。

- ・ 製品別装置別標準工程所要時間
- ・ 製品別装置別工程所要時間の標準偏差
- ・ 製品別装置別戦略別工程別短縮可能時間

これらの情報はすべて製品別装置別工程別に設定する情報であるので、レシピとして定義する

ことが可能である。

従来の配合および製造手順に特化したレシピ情報に前述した情報を付加することにより、工程進捗をコントロールすることを考慮したバッチ間のバッファ時間を設定することが可能となり、不確定要素に対してロバストなスケジュールを立案することが可能になると考えられる。

第3章では、バッチプロセスオペレーションという切り口で、不確定要素への対応手法に関する提案を行った。

第2章で工程進捗をコントロールする概念を取り入れたが、生産スケジュール立案時にオフラインで利用するための手法であり、運転開始後実際に遅延が発生した場合にどのように対処すべきかについての具体的な方法は示していなかった。そこで第3章では、運転中に遅延が発生した場合に、設定した戦略および復帰バッチ数において、元のスケジュール状態に戻すために時間短縮が必要な工程とその短縮時間を運転員に提示するガイダンスシステムを提案した。運転員にとって、現在時刻以降の進捗状況を推測することは熟練を要する技能の一つであるため、その状況が戦略毎に可視化されることは、作業段取り上非常に強力な支援機能になる。

提案したシステムでは、運転制御システムと連携してオンラインでガントチャートを表示するとともに、戦略毎に元のスケジュールに戻るまでの各装置のバッチの進捗状況をシミュレーション可能とした。また本システムは、第2章でレシピ情報として付加した工程進捗コントロール用の情報があれば実現可能である。

これまで経験に基づいて行われてきたスケジュール遅延時の対応に最適化の概念を導入することにより、遅延時の対応の標準化とコスト削減が図れ、プロセスの安定運転にもつながるとともに不確定要素による工程進捗の変動にも対応可能となることが期待できる。

第4章では、レシピ設計業務という切り口で不確定要素への対応手法に関する提案を行った。過去の試作/製造実績に基づいて製造条件と製品品質との関係をモデル化しレシピ情報として取り込むことにより製造環境の変化に対応させることを考え、そのようなレシピを「モデル埋め込みレシピ」と定義した。そして、樹脂コンパウンド製品のレシピ設計を対象にモデル埋め込みレシピの有効性を検証した。

レシピ設計において最も重要な情報は顧客要求品質である。しかし、樹脂コンパウンド業界をはじめとするサプライチェーンの川中に位置する企業では、客先での評価基準での抽象的な品質が提示されることが多く、最終的に顧客が品質評価を行う。この品質評価結果は、顧客が使用する原料の特性や製造条件に依存する。そしてこれらの情報はメーカーに開示されず、評価結果のみが伝えられるため、メーカーは極めて不確定性の高い状況下で製品を製造するためのレシピを設計しなければならない。

そこで、企業に蓄積されたレシピとその客先での評価結果には、様々な不確定要素とその影響が内在されていると想定して、樹脂着色剤のように客先評価が使えるか否かという定性的な品質情報しか得られないプロセスを対象に多変量解析手法を適用することによりレシピ情報と客先評価との関係をモデル化することを試みた。

定性的な品質情報に対して良/不良クラスおよびそれを判別する軸を設定することにより、

不良率という物理的意味を与える定量化法を採用した．このような考え方を採用することにより、レシピ情報と不良率を対応づけることが可能となり、その結果として、モデルに基づくレシピ設計が可能となり、モデル埋め込みレシピの有効性が検証できた．

今回提案したモデル埋め込みレシピでは、蓄積されたレシピと客先評価結果との対応関係を統計的に処理しモデル化している．これは、熟練技術者が勘と経験に基づいて頭の中で実施していることを品質モデルとして可視化したものと見なすことができる．この品質モデルは、過去の試作実績に基づいて導き出された情報であるため、過去に経験した不確定要素の情報を含んでいる．それゆえ、顧客から提示された品質要求に対して、品質モデルにレシピ案を入力することにより、経験の範囲で不良率を予測し、予測不良率が高い場合には、影響度解析結果に基づいてレシピを修正することにより不良率を下げる事が可能になる．このようにモデルをレシピに埋め込むことにより、レシピに経験を反映してフォミュラ値を修正できる機能を持たせることができ、試作環境を取り巻く不確定要素にも柔軟に対応できる可能性が高くなると期待できる．

第4章の検討結果から、不確定要素に対応する上で過去に経験した様々な変動を含んだ製造や試作実績に基づいて構築したモデルをレシピに埋め込むことにより、経験の範囲で不確定な変動に対応したレシピ設計が可能になることがわかった．同様にバッチプロセスの工程進捗コントロールをテーマにした第2章および第3章の提案内容に関しても、各装置の運転開始時刻および終了時刻算出モデル、製品別、装置別、工程別コントロール可能時間と最大遅延時間、コントロール実施コスト等をレシピ情報として取り込むことにより、不確定な遅延発生に対しても初期スケジュールに戻すための指示が可能になることがわかった．

第4章にてモデル埋め込みレシピの概念図を示したが、第2章および第3章の提案内容に関してもモデル埋め込みレシピとして Figures 6.1 - 6.2 で表現できると考えられる．汎用的には Figure 6.3 にて表現できる．

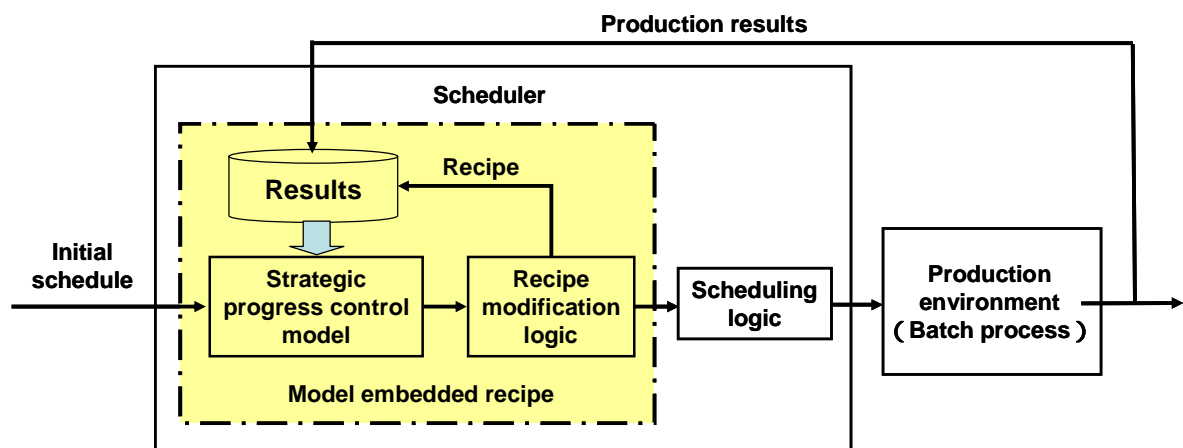


Figure 6.1 Model embedded recipe for scheduling

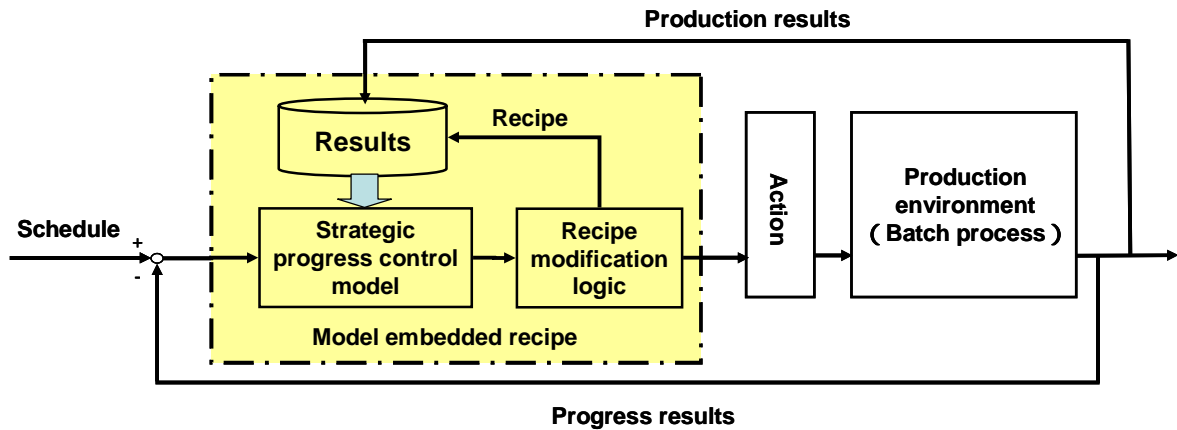


Figure 6.2 Model embedded recipe for batch process operation

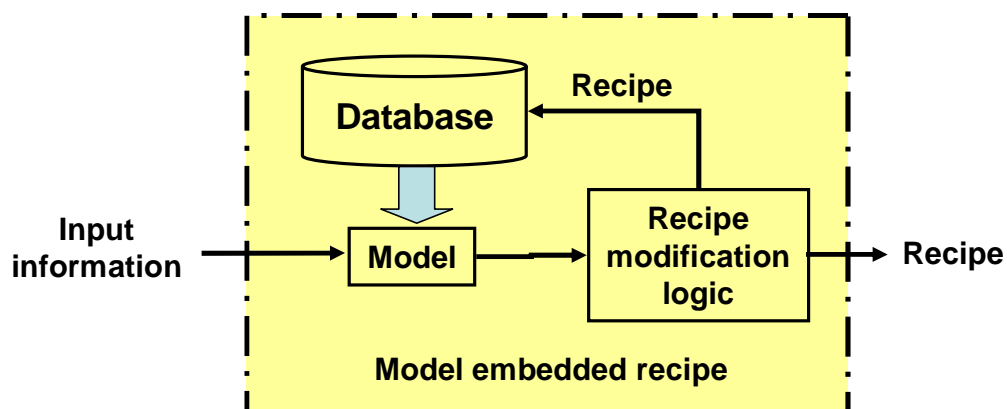


Figure 6.3 Model embedded recipe structure

埋め込むモデルは、本研究で提案したような物理モデルや統計モデルに限定したものではなく、データベース、ルール/ロジック、根拠が記述してあるドキュメント等、不確定要素を削減する上で有効な情報源を想定している。

一方、レシピ構造だけ用意しても、はじめから製造に適用できる情報を格納できるケースは稀であるので、中身を充実化する仕組みが必要である。仕組みを考える際に不確定要素の少ないレシピを設計するという課題は、一部署だけで解決することは難しいと考えられるので、研究開発、プロセス開発、レシピ設計、データ解析、オペレーション、設備メンテナンス、情報

システム等の専門チームで構成される組織でモデル埋め込みレシピを作り込むようにマネジメントすることが必要である。そこで第5章では、技術開発を主とする企業のバッチプロセス操業管理は、製造環境に応じて個々のレシピを作り込んでいくのではなく、モデル埋め込みレシピを組織で作ることにフォーカスすべきであるとの考えから、そのためのマネジメント手法を提案した。レシピは「知見の集約」となるべきであり、経験する都度、その経験で得られた知見をレシピにフィードバックする仕組みを構築すべきであるとする。それゆえ、組織で得られた知見、特に失敗等のネガティブ情報をつぎの設計に有効にフィードバックできる仕組みに関する研究を積極的に進めていかなければ、不確定要素への対応は行き詰まってしまう。

人間の思考／業務を単に自動化するだけでは人間の能力が退化してしまう。それゆえ、人間とシステムが協調して人間の能力を最大限に引き出すことを意識したシステムの開発が望ましい。そこでまず、自分達が経験した実績を知見／根拠としてモデル化し、つぎにレシピとして可視化し、最終的にバッチプロセスにおいて発生する現象のメカニズムの解明につながり、新たなレシピの設計に展開できるようなスパイラルアップの仕組み／手法の開発が必要である。そのような観点で、モデル埋め込みレシピがその中核を成すということを本研究で示すことができたと考えられる。

本研究では、不確定性が高い環境においてもバッチプロセスの長所を最大限に発揮することを目指して、バッチプロセスに関わる業務毎の支援機能を開発することを通じて、レシピ構造のあるべき姿について検討した。本研究が取り扱った範囲は、バッチプロセスを取り巻く環境を網羅するものではなく、まだまだ検討すべきことは残っている。しかしながら本研究が、今後ますます多様化するマーケットに追随していくためのレシピ構造研究のきっかけとなるとともに、製造業を活性化する要素技術の開発が促進に寄与できれば幸いである。

謝辞

本博士論文執筆において多くの方の御協力および御支援をいただきましたので、以下に感謝の気持ちを記します。

長谷部伸治教授には、社会人ドクターとしての御指導を快く引き受けて下さりまして心より感謝申し上げます。なかなか研究テーマが定まらず悪戦苦闘していた際にいろいろとヒントを与えていただくとともに6年間という長い期間に渡って温かい御指導をいただき何とか本論文の完成に至りました。最後まで面倒をみていただきましたこと感謝の念に耐えません。先生とディスカッションを重ねる毎に先生の素晴らしさを再認識し、その証として最初の論文では化学工学会論文集において優秀論文賞を受賞することができました。学問に対する姿勢、物事の見方といった様々な面において長谷部先生の指導を受けることができて本当に幸せであったと感じております。

本論文を完成させる過程におきまして貴重な御助言および御指導を賜りました大嶋正裕教授、河瀬元明教授には深く感謝いたします。

加納学准教授には、バッチプロセスにおけるデータ解析技術に関する様々な知見をいただきましたことを深く感謝いたします。また、論文の書き方、特に表現方法に関して御指導をいただきましてとても勉強になりました。

元名古屋工業大学教授の伊藤利昭先生には、社会人ドクターになるきっかけを与えて下さっただけでなく、論文の内容に対する御助言や当方への励ましのお言葉を幾度と無くいただき公私共にバックアップして下さいましたことを心より感謝いたします。

名古屋工業大学教授の橋本芳宏先生には、レシピ構造およびレシピ設計に関する研究で活発なディスカッションをさせていただき一つの論文にまとめることに対して御尽力をいただくとともに、学位を取得するにあたり温かい励ましのお言葉をたくさんいただき心より感謝いたします。

東京工業大学准教授の淵野哲郎先生には、レシピ構造およびレシピ設計に関する研究で活発なディスカッションをさせていただきましたこと心より感謝いたします。

名古屋工業大学助教の浜口孝司先生には、研究テーマ選定の際に御協力いただきましたこと感謝いたします。

東京農工大学助教の北島貞二先生には、社会人ドクターになる上でいろいろと励ましていた

いただきましたこと感謝いたします。

東京大学助教の太田豊先生には、テーマ選定の際にいろいろな文献を御紹介いただきましたこと感謝いたします。

(株)三鈴エリーの布川了氏には、博士課程を受験する際に会社サイドからの推薦状を書いていただきましたこと感謝いたします。

三菱化学エンジニアリング(株)富永浩次氏には、テーマ選定の際にいろいろと相談に乗っていただくとともに励ましていただきましたこと感謝いたします。

NTTコミュニケーション科学基礎研究所の藤原幸一氏には、データ解析技術に関する知見をいただきましたこと感謝いたします。

東京インキ(株)菅野峰明氏および鹿野昌和氏には、「不確定要素を考慮したレシピ設計手法の開発とその樹脂コンパウンド製品設計への適用」の論文作成にあたり、貴重なレシピデータを御提供、解析結果評価に多大なる御協力をいただきましたこと深く感謝申し上げます。

リンク情報システム(株)の方向とう氏と奥様の簡朝暉様には、化学工学論文集の優秀論文賞受賞時に記念写真を撮っていただきましたことを感謝申し上げます。

石田弘秋氏および奥様の多美子様には、社会人ドクターと会社の仕事とを両立するにあたり、公私ともに多大なる御支援をいただき、そして常に激励して下さいましたこと感謝の念に耐えません。本当にありがとうございました。

最後に、6年間という長期間にわたり私のわがママを許し陰で支えてくれた妻悦子及び長女由莉と長男智大に、それから、粘り強く私を信じて学位取得を待っていてくれた父・河野勝浩そして母・河野芳子にこの場で深く感謝いたします。

本研究に関連する著者の発表論文

発表論文

- 1 . 河野浩司、長谷部伸治：処理時間の変動を考慮したバッチプロセスにおけるバッチ間バッファ時間設定方法，化学工学論文集，第 33 巻，第 4 号，pp.354-362，2007
.....（第 2 章に対応）
- 2 . 河野浩司、長谷部伸治：バッチプロセスにおける進捗管理支援システム，化学工学論文集，第 34 巻，第 3 号，pp.367-375，2008
.....（第 3 章に対応）
- 3 . 河野浩司、加納学、長谷部伸治、鹿野昌和：不確定要素を考慮したレシピ設計手法の開発とその樹脂コンパウンド製品設計への適用，化学工学論文集，第 36 巻，第 4 号，pp.405-412，2010
.....（第 4 章に対応）
- 4 . 河野浩司、長谷部伸治、橋本芳宏、淵野哲郎、伊藤利昭：レシピ設計業務におけるシミュレーションベースドマネジメント（投稿準備中）
.....（第 5 章に対応）
- 5 . T.Fuchino, T.Kitajima, Y.Shimada, K.Takeda, T.Hamaguchi, R.Batres, A.Yamada, K.Kawano and Y.Hashimoto; “Recipe Infomatics to shorten the lead time from product development in batch processes”, Proceedings of PSE/ESCAPE 2006, pp.2225-2230 (2006)
.....（第 5 章の一部に対応）

著書

- 1 . T.Hamaguchi, M.Inoue, T.Yoshida, K.Kawano, H.A.Gabbar, K.Takeda, Y.Shimada, T.Kitajima and Y.Hashimoto; “Integration of Multi-agent Controller and Scheduler for Multi-purpose and Multi-batch Plant”, Lecture Notes in Artificial Intelligence 4693, Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, pp.736-743, Springer (2007)

- 2 . T.Hamaguchi, T.Yamazaki, K.Mou, M.Sakamoto, K.Kawano, T.Kitajima, Y.Shimada, Y.Hashimoto and T.Itoh; “ Analogical Reasoning based on Task Ontologies for On-line Support ”, Lecture Notes in Artificial Intelligence 3681, Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, pp.155-161, Springer (2005)